

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial: Especialidad en Mecánica
de Máquinas y Estructuras

Estudio y análisis de sistemas de bombeo fotovoltaico en comunidades rurales de Nicaragua

Autor: Jaime Cerrolaza Sanz

Tutora: Mónica Chinchilla Sánchez

Agradecimientos

A mi familia, por darme la oportunidad y el apoyo para llegar hasta aquí.

A Mónica Chinchilla, Ulpiano Ruiz, Jorge Martínez y todo el grupo de tecnologías apropiadas de la Universidad Carlos III, así como a todos los miembros de la oficina de cooperación. Gracias por haberme permitido vivir una experiencia inolvidable.

A Luis Lorenzo Fuentes, por su apoyo, cariño e inolvidables aventuras en moto.

A Harenia Maldonado y Maykol Jarquin, por su colaboración e implicación en el proyecto.

A los habitantes de “El Limón” y “El Lagartillo”, por su increíble recibimiento y calidad humana.

En último lugar, pero no por ello menos importante, mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que, altruistamente, dedican su tiempo y esfuerzo para que este mundo sea, día a día, un poco más justo.

ÍNDICE

ÍNDICE	3
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
INTRODUCCIÓN	8
Motivación del proyecto	9
Contexto del proyecto y objetivos	9
Estructura del documento	9
1. MARCO DEL PROYECTO Y ANTECEDENTES	10
1.1 Agua y cooperación	10
1.1.1 ODS Agua y Saneamiento	10
1.2 Nicaragua	15
1.2.1 Datos generales del país	15
1.2.2 Situación de los servicios de agua potable y saneamiento	20
1.2.3 Marco jurídico e institucional	23
1.3 Comités de Agua Potable y Saneamiento (CAPS)	28
1.4 Cooperación internacional en Nicaragua	33
2. SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA	38
2.1 Estructura de la sección	38
2.2 Sistemas tradicionales de abastecimiento de agua	39
2.3 Sistemas mejorados de abastecimiento de agua	41
2.3.1 Captación	42
2.3.2 Sistema de bombeo	44
2.3.3 Conducción	51

2.3.4 Almacenamiento	52
2.3.5 Distribución	53
2.3.6 Almacenamiento doméstico	54
2.4 Sistemas de generación fotovoltaicos.....	55
2.4.1 Principio de funcionamiento	55
2.4.2 Tipos de Células Solares	58
2.4.3 Paneles Fotovoltaicos	59
2.4.4 Parámetros de un panel fotovoltaico	59
2.4.5 Curva característica	61
2.4.6 Variación de corriente y potencia en función de irradiancia incidente	61
2.4.7 Variación de la tensión en función de la temperatura	62
2.4.8 Orientación de un módulo fotovoltaico	62
2.4.9 Efectos de degradación en células fotovoltaicas	63
2.4.10 Configuración de paneles fotovoltaicos	64
2.5 Sistemas de bombeo fotovoltaico (SBFV)	65
2.5.1 Factores a tener en cuenta a la hora de realizar una instalación de un sistema de bombeo solar fotovoltaico	67
2.5.2 Tipos de sistemas de bombeo fotovoltaicos	68
2.5.3 Componentes de un sistema de bombeo fotovoltaico.....	71
2.6 Dimensionado de un sistema de bombeo fotovoltaico	74
2.6.1 Determinación de necesidades hidráulicas	75
2.6.2 Determinación del recurso solar	80
2.6.3 Selección de componentes.....	82
 3. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE BOMBEO FOTOVOLTAICO REALES.....	 85
 3.1 Introducción al estudio	 85
3.2 El Limón	86
3.2.1 Descripción del sistema	88
3.2.2 Elementos del sistema	89
3.2.3 Estudio teórico	98
3.2.4 Análisis experimental.....	104
3.2.5 Presentación de resultados	111
3.2.6 Problemas identificados	118
3.3 El Lagartillo	121

3.3.1 Descripción del sistema	125
3.3.2 Elementos del sistema.....	126
3.3.3 Estudio teórico	132
3.3.4 Análisis experimental.....	137
3.3.5 Presentación de resultados	142
3.3.6 Problemas identificados:	149
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	152

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).	11
Figura 2 Mapa de Nicaragua y principales comunicaciones	15
Figura 3 Evolución del IDH en Guatemala, Honduras y Nicaragua	16
Figura 4 Niveles de IDH en los diferentes departamentos de Nicaragua	17
Figura 5 Pirámide de población de Nicaragua	18
Figura 6 Evolución de la cobertura de sistemas mejorados de agua y saneamiento	21
Figura 7 Inversión extranjera en infraestructura de agua y saneamiento.	27
Figura 8 Estructura de un CAPS.	29
Figura 9 Red de Comités de Agua Potable y Saneamiento.	32
Figura 10 Sistemas tradicionales.	39
Figura 11 Esquema de un sistema de abastecimiento de agua mejorado.	41
Figura 12 Pozo perforado y sus partes.	43
Figura 13 Bomba de mecate	46
Figura 14 Bomba EMAS	48
Figura 15 Efecto fotovoltaico en células de silicio dopado	55
Figura 16 Símbolo empleado para designar células fotovoltaicas	56
Figura 17 Cronología de las eficiencias de conversión en células solares fotovoltaicas.	57
Figura 18 Módulo FV de 32 células interconectadas en serie.	59
Figura 19 Elementos de un panel fotovoltaico	59
Figura 20 Curva característica fotovoltaica	61
Figura 21 Variación de la potencia	61
Figura 22 Variación de la corriente	61
Figura 23 Variación de la tensión en función de la temperatura (irradiancia CEM).	62
Figura 24 Ángulos azimuth e inclinación	62
Figura 25 Efecto de LID.	63
Figura 26 Arreglo 4S X 3P	64
Figura 27 Uso de energía solar fotovoltaica en el medio rural (datos en <i>MWp</i>).	65
Figura 28 Fuentes de generación más apropiadas en función del volumen extraído y la carga dinámica.	66
Figura 29 Distribución del recurso solar.	66
Figura 30 Configuración común de sistemas de bombeo directo de baja potencia.	69
Figura 31 Esquema de un sistema de bombeo fotovoltaico	71
Figura 32 Bomba sumergible.	73
Figura 33 Asociación de bombas en serie	73
Figura 34 Asociación de bombas en paralelo	73
Figura 35 Ejemplo de demanda desarrollado a partir de los datos de consumo de la comunidad de “El Limón”	76
Figura 36 Abatimiento en un pozo perforado.	77
Figura 37 Curvas características de la familia de bombas Grundfos SQFlex.	83
Figura 38 Ejemplos de patrones de producción y consumo de agua.	84
Figura 39 Curva característica del módulo BP380U	91
Figura 40 Bomba 11 SQF-2	95
Figura 41 Curva de rendimiento de la bomba Grundfos 11 SQF-2.	95
Figura 42 Consumo mensual de la comunidad de “El Limón”	97
Figura 43 Consumo medio mensual de la comunidad de “El Limón”	97
Figura 44 Diagrama de Moody	102

Figura 45 Muestra de irradiancia	105
Figura 46 Muestra de irradiancia	106
Figura 47 Muestra 1 de irradiancia	106
Figura 48 Muestra 2 de irradiancia	107
Figura 49 Muestra 3 de irradiancia	108
Figura 50 Relación caudal vs irradiancia	109
Figura 51 irradiancia vs potencia	109
Figura 52 Curva característica de la bomba.	116
Figura 53 Esquema del SBFV instalado en la comunidad de “El Lagartillo”	125
Figura 54 Curva característica del módulo ASE-100-GT-FT-K E 1205.....	128
Figura 55 Bomba SP A5-06	131
Figura 56 Curva característica de la bomba.	131
Figura 57 Muestra 1 de irradiancia	139
Figura 58 Muestra 2 de irradiancia	140
Figura 59 Curva de potencias P1 y P2 de la bomba	141
Figura 60 Punto de trabajo de la bomba.....	148

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cobertura de sistemas de saneamiento en Nicaragua.....	21
Tabla 2 Ejemplo real de autoevaluación de una comunidad hondureña en octubre de 1992... 40	
Tabla 3 Condiciones de funcionamiento de diferentes tipos de bombas.	44
Tabla 4 Consumos estimados de agua (Sandia Lab. y tesis CIEMAT).....	75
Tabla 5 Coeficientes de Hazen-Williams para diferentes materiales.....	79
Tabla 6 Coeficientes k de pérdidas locales (Ciemat).....	79
Tabla 7 Financiación del Proyecto de “El Limón”	96
Tabla 8 Consumo de agua en la comunidad de “El Limón”	97
Tabla 9 Irradiación solar media diaria y temperatura del aire. Fuente: NASA	98
Tabla 10 Irradiancia vs caudal	105
Tabla 11 Irradiancia vs caudal	107
Tabla 12 Niveles estático y dinámico	110
Tabla 13 Parámetros eléctricos del controlador	129
Tabla 14 valores de radiación solar y temperatura media del aire. Fuente: NASA	132
Tabla 15 Datos experimentales de la primera sesión	137
Tabla 16 Datos experimentales de la segunda sesión	140

INTRODUCCIÓN

Este proyecto consiste en el estudio y análisis de sistemas de bombeo fotovoltaico en comunidades rurales de Nicaragua. Se ofrece una amplia descripción de la problemática del agua en el medio rural nicaragüense, así como un recorrido a lo largo de los diferentes tipos de sistemas y elementos que los forman.

El estudio de los dos casos reales de comunidades rurales se apoya en el trabajo de campo realizado por el autor dentro del marco del “Programa de Voluntariado Internacional de las Universidades Públicas de la Comunidad Madrid (IXª edición 2016)”. La participación del mismo en este programa en calidad de colaborador en el centro de energías renovables en Estelí de la UNAN-Managua hizo posible el acceso directo a estas comunidades del ámbito rural.

Motivación del proyecto

Este proyecto está motivado por uno de los principales problemas de muchos seres humanos, el acceso asegurado a agua potable de calidad. Durante la estancia en Nicaragua tuve la oportunidad de observar en primera persona las consecuencias de esta falta de acceso y trabajar en conjunto con los usuarios de los sistemas.

Esta experiencia motivó la realización de un documento de análisis, tanto para la identificación y solución de problemas en las comunidades estudiadas como para servir de documento de referencia para posteriores acciones relacionadas en proyectos similares.

Contexto del proyecto y objetivos

Este proyecto se sitúa en el marco de la cooperación internacional, específicamente en el objetivo nº 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible: “Garantizar el acceso a agua limpia y saneamiento”.

La realidad del medio rural en Nicaragua es compleja, por lo que en este documento se pretende realizar un acercamiento a la misma previo al estudio de los sistemas de bombeo fotovoltaicos.

Este proyecto tiene varios objetivos:

- Realizar un estudio completo de dos casos reales de sistemas de bombeo fotovoltaico en comunidades rurales de Nicaragua, incluyendo tanto una modelización teórica del sistema como los resultados experimentales de los datos recogidos en campo.
- Servir de documento de referencia para posteriores estudios en la materia, especialmente ligado al trabajo desarrollado por el “Centro de Investigación de Energías Renovables” (CIER) de la UNAN-Managua en Estelí.

Estructura del documento

La primera sección de este documento describe las motivaciones tras el desarrollo de este proyecto, explicando la problemática del agua y la realidad de las comunidades rurales de Nicaragua. Se explica en detalle el contexto de los proyectos de abastecimiento de agua, tanto a nivel social como administrativo

En la segunda parte del proyecto se profundiza en los diferentes sistemas de abastecimiento de agua en el medio rural y sus elementos, así como diferentes configuraciones y condiciones de operación de los mismos. Se explica detalladamente la metodología de diseño de sistemas de bombeo fotovoltaico, asentando la base técnica para el posterior análisis de los dos casos reales.

Tras situar al lector en el marco apropiado, se procede al estudio y análisis de dos casos reales: un sistema de bombeo fotovoltaico híbrido en el área periurbana de Estelí y un sistema de bombeo fotovoltaico directo en una comunidad rural prácticamente aislada en el departamento de León. En ambas comunidades se realiza una descripción de las mismas, de los elementos de su sistema, un estudio del funcionamiento teórico del sistema y un análisis experimental con mediciones reales en terreno. Los resultados son comparados y discutidos para una posterior identificación de problemas.

1. Marco del proyecto y antecedentes

1.1 Agua y cooperación

1.1.1 ODS Agua y Saneamiento

Este proyecto se encuentra enmarcado dentro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, adoptados por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). El PNUD define los ODS de la siguiente manera: [1]

“Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), también conocidos como Objetivos Mundiales, son un llamado universal a la adopción de medidas para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad. Los ODS se lanzaron en 2000 y fijaron el 2015 como el año objetivo.

Reconociendo el éxito de estos objetivos – y el hecho de que una nueva agenda de desarrollo se necesitaba para después de 2015 – los países acordaron en 2012 en Río+20, la Conferencia sobre el Desarrollo Sostenible, establecer un grupo de trabajo abierto para desarrollar un conjunto de objetivos de desarrollo sostenible.

Después de más de un año de negociaciones, el Grupo de Trabajo Abierto presentó su recomendación para los 17 objetivos de desarrollo sostenible. Hay 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) con 169 metas a diferencia de los 8 Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) con 21 metas. Los complejos desafíos que existen en el mundo hoy en día exigen que una amplia gama de cuestiones esté cubierta. Es, asimismo, fundamental abordar las causas fundamentales de los problemas y no solo los síntomas.

Los objetivos son de amplio alcance, ya que se abordarán los elementos interconectados del desarrollo sostenible: el crecimiento económico, la inclusión social y la protección del medio ambiente. Los ODM se centraron principalmente en la agenda social. Los ODM estaban dirigidos a los países en desarrollo, en particular los más pobres, mientras que los objetivos de desarrollo sostenible se aplicarán a todo el mundo, los ricos y los pobres”.

A diferencia de los ODM, que fueron elaborados por un grupo de expertos a puerta cerrada, los objetivos de desarrollo sostenible son el resultado de un proceso de negociación que involucró a los 193 Estados Miembros de la ONU y también la participación sin precedentes de la sociedad civil y otras partes interesadas. Esto llevó a la representación de una amplia gama de intereses y perspectivas.”

Estos 17 Objetivos están basados en los logros de los Objetivos de Desarrollo del Milenio, incluyendo nuevas esferas como el cambio climático, la desigualdad económica, la innovación, el consumo sostenible y la paz y la justicia, entre otras prioridades. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible están interrelacionados, con frecuencia la clave del éxito de uno involucrará las cuestiones más frecuentemente vinculadas con otro.



Figura 1 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Fuente: [1]

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible conllevan un espíritu de colaboración y pragmatismo para elegir las mejores opciones con el fin de mejorar la vida, de manera sostenible, para las generaciones futuras. Proporcionan orientaciones y metas claras para su adopción por todos los países en conformidad con sus propias prioridades y los desafíos ambientales del mundo en general.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible son una agenda inclusiva. Abordan las causas fundamentales de la pobreza y nos unen para lograr un cambio positivo en beneficio de las personas y el planeta.

“Apoyar la puesta en marcha de la Agenda 2030 es una prioridad importante para el PNUD”, afirma la Administradora del PNUD, Helen Clark. “Los ODS nos proporcionan un plan y una agenda comunes para abordar algunos de los retos más apremiantes que enfrenta nuestro mundo, como la pobreza, el cambio climático y los conflictos. El PNUD tiene la experiencia y los conocimientos especializados para impulsar el progreso y ayudar a los países a tomar la senda del desarrollo sostenible.” [1]

Objetivo 6: Agua limpia y Saneamiento

Este proyecto se encuentra enmarcado en el Objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible:

“Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”



Abastecimiento de agua en el medio rural. Fuente: Autor

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) resume la problemática del agua como sigue a continuación:

“La escasez de agua afecta a más del 40% de la población mundial, una cifra alarmante que probablemente crecerá con el aumento de las temperaturas globales producto del cambio climático. Aunque 2.100 millones de personas han conseguido acceso a mejores condiciones de agua y saneamiento desde 1990, la decreciente disponibilidad de agua potable de calidad es un problema importante que aqueja a todos los continentes.

En 2011, 41 países experimentaban estrés hídrico; 10 de ellos estaban a punto de agotar su suministro de agua dulce renovable y ahora dependen de fuentes alternativas. El aumento de las sequías y la desertificación ya está empeorando estas tendencias. Se estima que al menos una de cada cuatro personas se verá afectada por escasez recurrente de agua para 2050.

Con el fin de garantizar el acceso universal al agua potable segura y asequible para todos en 2030, es necesario realizar inversiones adecuadas en infraestructura, proporcionar instalaciones sanitarias y fomentar prácticas de higiene en todos los niveles.

Si queremos mitigar la escasez de agua, es fundamental proteger y recuperar los ecosistemas relacionados con este recurso, como los bosques, montañas, humedales y ríos. También se requiere más cooperación internacional para estimular la eficiencia hídrica y apoyar tecnologías de tratamiento en los países en desarrollo. “ [1]

Desde el año 1990, más de 2.600 millones de personas han obtenido acceso a fuentes mejoradas de agua potable, pero 663 millones de personas todavía carecen de dicho acceso. A continuación, se presentan algunos datos relevantes sobre la problemática del agua:

- Al menos 1.800 millones de personas en el mundo utilizan una fuente de agua potable que está contaminada con materia fecal.
- Entre 1990 y 2015, la proporción de la población mundial que utilizaba mejores fuentes de agua potable aumentó del 76% al 91%.
- Sin embargo, la escasez de agua afecta a más del 40% de la población mundial, y se prevé que esta cifra aumente. Más de 1.700 millones de personas viven actualmente en cuencas fluviales donde el consumo de agua es superior a la recarga.
- Actualmente, 2.400 millones de personas carecen de acceso a servicios básicos de saneamiento, como retretes o letrinas.
- Más del 80% de las aguas residuales resultantes de las actividades humanas se vierte en ríos o el mar sin que se eliminen los contaminantes.
- Cada día, cerca de 1.000 niños mueren a causa de enfermedades diarreicas prevenibles relacionadas con el agua y el saneamiento.
- La energía hidroeléctrica es la fuente de energía renovable más importante y más utilizada y, en 2011, representó el 16% de la producción total de electricidad en el mundo.
- Aproximadamente el 70% del agua extraída de los ríos, lagos y acuíferos se utiliza para el riego.
- El 70% de las muertes causadas por desastres naturales se deben a las inundaciones y los desastres relacionados con el agua.

[1]

El Objetivo de Desarrollo nº 6: Agua y Saneamiento se plantea las siguientes metas en su agenda 2030:

- Lograr el acceso universal y equitativo al agua potable, a un precio asequible para todos
- Lograr el acceso equitativo a servicios de saneamiento e higiene adecuados para todos y poner fin a la defecación al aire libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y las personas en situaciones vulnerables.
- Mejorar la calidad del agua mediante la reducción de la contaminación, la eliminación del vertimiento y la reducción al mínimo de la descarga de materiales y productos químicos peligrosos, la reducción a la mitad del porcentaje de aguas residuales sin tratar y un aumento sustancial del reciclado y la reutilización en condiciones de seguridad a nivel mundial
- Aumentar sustancialmente la utilización eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir sustancialmente el número de personas que sufren de escasez de agua.
- Poner en práctica la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda.
- Proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos.
- Ampliar la cooperación internacional y el apoyo prestado a los países en desarrollo para la creación de capacidad en actividades y programas relativos al agua y el saneamiento, incluidos el acopio y almacenamiento de agua, la desalinización, el aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos, el tratamiento de aguas residuales y las tecnologías de reciclaje y reutilización.
- Apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento

[1]

Nicaragua es un país volcánico y tropical, no en vano conocido como “tierra de lagos y volcanes”. En su interior alberga dos grandes lagos: el lago Managua (conocido por los nicaragüenses como Xolotlán) y el Gran lago de Nicaragua (también llamado Cocibolca). En la zona del Pacífico se encuentra una cadena de 19 volcanes que la atraviesa de norte a sur, los Maribios.

El pueblo nicaragüense es de naturaleza multiétnica y principalmente de español, la que también es la lengua oficial del país. Existen diversas poblaciones indígenas, especialmente en la costa del Caribe, tales como garífunas, ramas o misquitos. Según el IDH, a partir del año 1995, Nicaragua ha venido mejorando su nivel de vida. El PIB de Nicaragua suma 35 675 millones de USD, situando al país en el puesto 101º.

Nicaragua es un país internacionalmente reconocido por un manejo económico responsable y apropiado, resultando un crecimiento del PIB de 4.5%, promedio de los últimos tres años. Las condiciones mejoran lentamente. Con ayuda internacional, especialmente de Venezuela, el gobierno impulsa programas sociales de mitigación de la pobreza. El sector energético y el turismo muestran un crecimiento positivo de mucho significado para toda la nación.

Según datos de 2015 el IDH de Nicaragua es de 0,631, lo cual sitúa al país en el puesto 125º. la esperanza de vida en Nicaragua está en 74,81 años, su tasa de mortalidad en el 4,75‰ y su renta per cápita es de 1.476€ euros. Dentro de la región centroamericana supera el IDH de países como Honduras (0,606) y Guatemala (0,627), pero no así a otros países vecinos como El Salvador (0,666) o Costa Rica (0,776), siendo este último el principal destino de inmigración de la población nicaragüense junto con Estados Unidos.

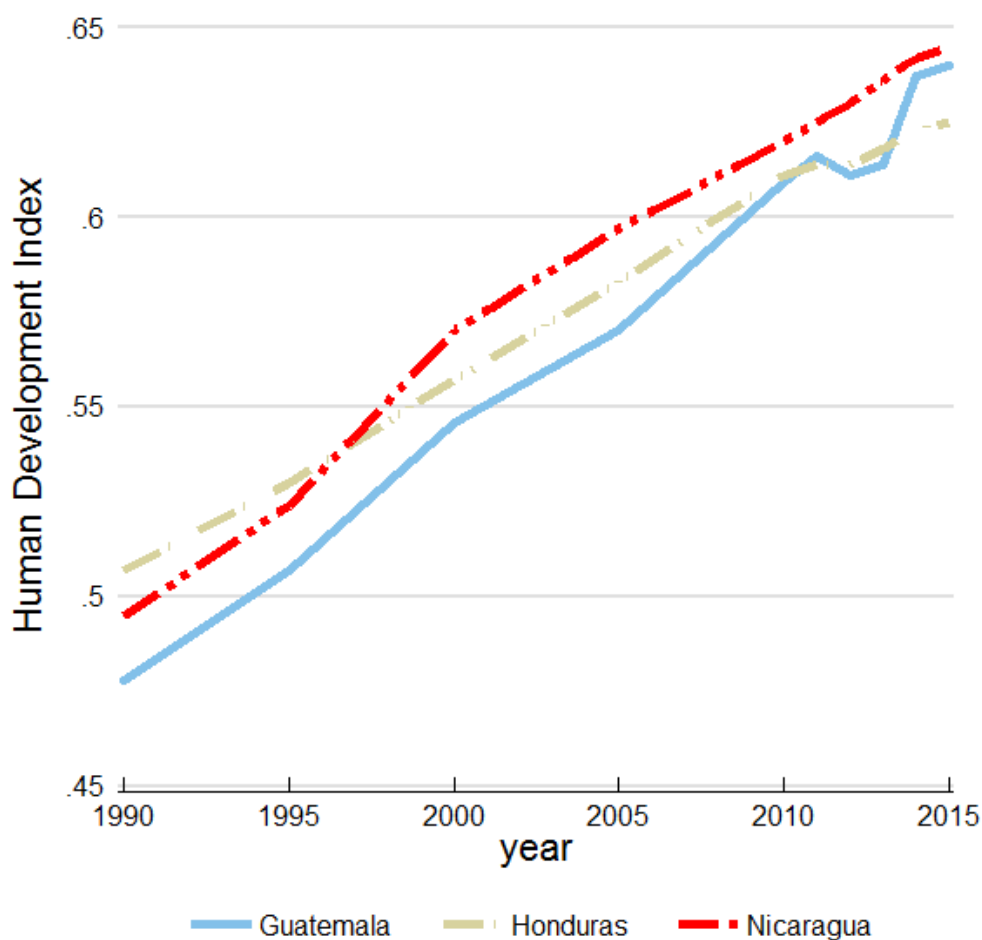


Figura 3 Evolución del IDH en Guatemala, Honduras y Nicaragua

Si bien el IDH de Nicaragua es de 0,631, cabe destacar las diferencias internas que surgen entre los distintos puntos del país, siendo estas muy apreciables. De igual manera existe una inmensa diferencia entre los núcleos de población urbanos, que aglutinan en torno a un 60% de la población, y las zonas rurales, generalmente de pequeño tamaño, mal comunicadas y con un desarrollo de infraestructura muy inferior. En el siguiente mapa podemos ver el IDH de los diferentes departamentos que forman Nicaragua, si bien los datos no están actualizados a valores de 2017 permiten observar la diferencia patente:

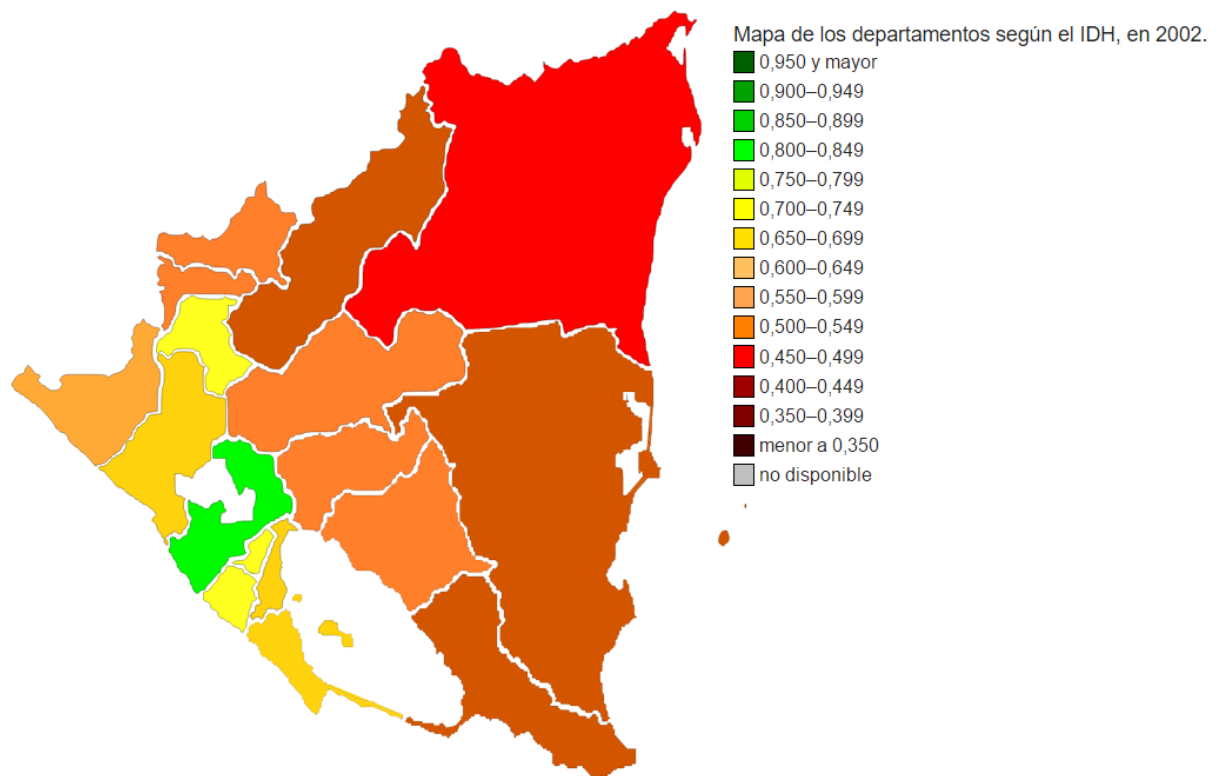


Figura 4 Niveles de IDH en los diferentes departamentos de Nicaragua

Como queda patente, la diferencia regional es notable. Las regiones con menor IDH son la Región Autónoma del Atlántico Norte (RAAN) y la Región Autónoma del Atlántico Sur (RAAS). Ambas regiones están compuestas por pequeñas comunidades rurales de etnia misquita, garífuna o rama, entre otras. No existen grandes núcleos de población salvo Puerto Cabezas (40.000 habitantes aprox.) en la RAAN y Bluefields (40.000 habitantes aprox.) en la RAAS. [2]

Las comunidades analizadas en este estudio pertenecen a la zona Norte del país. La comunidad de “El Limón” pertenece al departamento de Estelí, con un IDH medio de 0,712. La comunidad de “El Lagartillo” pertenece al departamento de León, con un IDH medio de 0,781. Cabe destacar que la ciudad de León, cabecera del departamento, es una de las principales atracciones turísticas del país y por tanto cuenta con un ingreso importante de capital externo. No obstante, la realidad del ámbito rural es muy distinta a la de la ciudad. En el caso de “El Lagartillo”, el trayecto a León dilata más de dos horas.

De forma general, en Nicaragua la pobreza afecta a 2,3 millones de personas, aproximadamente la mitad de la población del país. Existe un 14,9% de la población bajo el nivel de pobreza extrema. Además, el 21,7% de la población infantil sufre desnutrición crónica, lo que constituye uno de los índices más altos de Centroamérica.

A continuación, se presentan unos datos de interés para entender mejor la realidad del país. Estos datos han sido extraídos de un informe del Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo (PNUD): [3]

- Tasa de crecimiento poblacional (2014) = 1.2%
- Población rural (2010) = 40.4%
- Porcentaje de población urbana (2014) = 58.3%
- Población en condición de pobreza general (2014) = 29.6%
- Tasa de desempleo (2014) = 6.8%
- Tasa de mortalidad infantil (muertes por cada 1,000 nacidos vivos) (2014) = 18.4
- Proporción de la superficie de tierras cubiertas por bosques (2008) = 25%

Pirámide de población

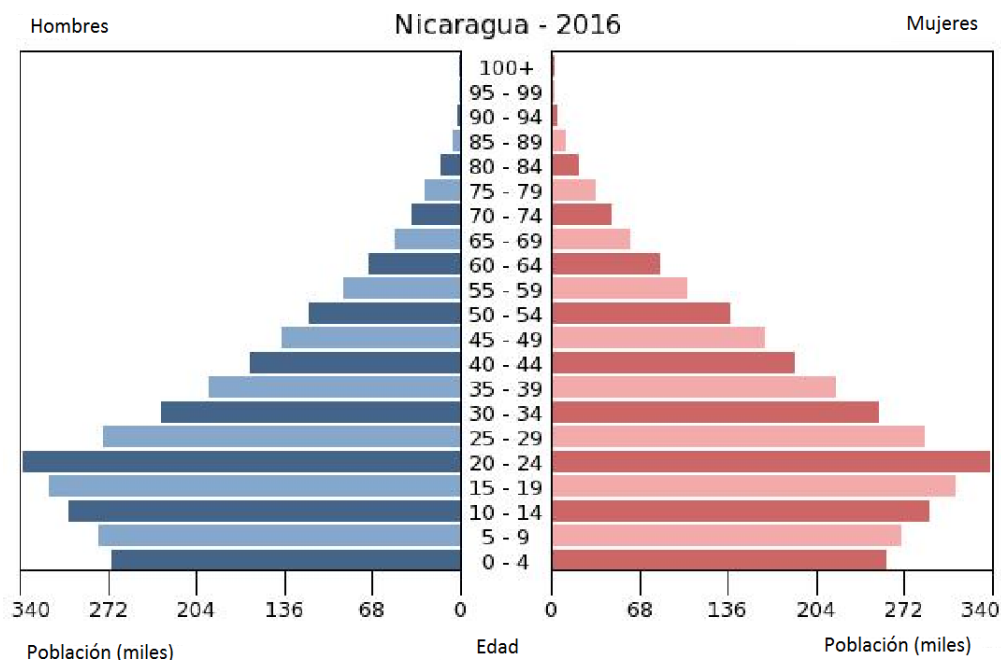


Figura 5 Pirámide de población de Nicaragua [35]

Como podemos observar en la imagen, la pirámide de población nos muestra un enorme porcentaje de población joven. No es un caso aislado en Centroamérica, las pirámides de población de países vecinos como Guatemala y Honduras muestran también esta realidad.

Situación política

“La realidad política del país es un tanto compleja, por lo que una pequeña introducción a la misma es clave para poder abordar cualquier tipo de estudio en el país.

Tras décadas de intervención y fuerte influencia extranjera, mediante la Revolución nicaragüense, se instauró una Junta de Gobierno de Reconstrucción Nacional (1979-1985) constituida como junta de gobierno transitoria encargada del poder ejecutivo y un Consejo de Estado encargado del poder legislativo con participación de representantes de los ámbitos político, social, comunal y religioso.

En 1984 se realizan las primeras elecciones populares conforme a la nueva Ley electoral. La Junta de Gobierno de Reconstrucción Nacional entrega el poder al nuevo presidente elegido: Daniel Ortega Saavedra (actual presidente de Nicaragua). Así La Junta transitoria queda disuelta.

Durante el gobierno del Frente Sandinista de Liberación Nacional (FSLN) el país sufrió un prolongado conflicto civil fomentado con la intervención de los Estados Unidos de América bajo la administración del presidente Ronald Reagan. El gobierno estadounidense, por medio de la CIA, formó y entrenó en secreto a grupos de rebeldes anticomunistas conocidos como Contras, financiando una guerra desautorizada por el Congreso y llegando a bloquear económicamente a Nicaragua. La Unión Soviética y países como Cuba, Francia y Libia también intervinieron en el conflicto a través de cooperación militar, económica, financiera y médica. Dicho conflicto motivó la demanda del gobierno de Nicaragua contra el gobierno de Estados Unidos de América ante la Corte Internacional de Justicia de La Haya, en el conocido caso Nicaragua contra Estados Unidos. La sentencia favorable a Nicaragua obligaba al gobierno de Estados Unidos de América a indemnizar a la República de Nicaragua, deuda que luego fue perdonada al gobierno de Estados Unidos de América por el gobierno nicaragüense de la presidenta Violeta Barrios de Chamorro.

Los conflictos económicos y de guerra culminaron tras las elecciones populares del 25 de febrero de 1990. Violeta Chamorro derrotó a Daniel Ortega con 54.7 % de los votos contra 40.8 %. Daniel Ortega continuó al frente del FSLN en la oposición hasta 2006, que volvió a ser proclamado presidente, cargo que ocupa hasta la actualidad tras las últimas elecciones en 2016.” [4]

En este contexto cabe destacar una noticia de 2016. El gobierno del FSLN, presidido por Daniel Ortega, acusó al Plan de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) de una actitud intervencionista en el estado, resultando en un comunicado de rechazo por parte del PNUD. Se puede acceder al mismo a través del siguiente enlace:

Comunicado del PNUD: [link](#)

1.2.2 Situación de los servicios de agua potable y saneamiento

“Nicaragua es un país rico en recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos. No obstante, las fuentes de agua están siendo contaminadas por vertidos de un número importante de sistemas de agua y saneamiento urbanos (los cuales carecen de sistemas de tratamiento), la utilización indiscriminada de pesticidas y agroquímicos en áreas de cultivos y los desechos industriales. El uso intensivo del suelo y la deforestación afectan también la capacidad de recarga de fuentes y acuíferos. La distribución territorial de los recursos hídricos en el país es desigual y gran parte de la infraestructura es obsoleta y necesita ser rehabilitada y optimizada.

En consecuencia, Nicaragua, que tiene una de las tasas más altas de crecimiento poblacional de toda América Latina, sufre una carencia de servicios básicos de abastecimiento de agua potable y saneamiento. En las zonas rurales, el 31% de la población no tiene acceso a un servicio de agua potable y 37% no tiene acceso a instalaciones adecuadas para la evacuación y disposición de excretas. Esta población, que representa aproximadamente el 44% de la población total del país, ha sido tradicionalmente excluida de los programas de inversión en infraestructura social.

Por otra parte, la cobertura de abastecimiento de agua y saneamiento en las zonas urbanas y peri-urbanas es insuficiente. Aproximadamente el 77% de los hogares sufren continuos cortes de agua y un horario de servicio limitado. El 86% de la población urbana cuenta con acceso a servicios de alcantarillado sanitario, pero en el medio rural la realidad es diferente. Estas precarias condiciones de higiene representan la principal causa de enfermedades diarreicas, sobre todo entre los grupos más vulnerables como los niños menores de cinco años”. [4]

Los datos aquí incluidos han sido extraídos de un informe del “Joint Monitoring Programme” (JMP) [5] elaborado por la organización mundial de la salud (OMS) y UNICEF. Este informe recopila datos e indicadores en el país entre los años 1990 y 2015 y está disponible en el siguiente enlace:

JMP Nicaragua: [link](#)

Cobertura de agua potable en Nicaragua:

Tabla 1 Cobertura de agua potable en Nicaragua

	Urbano (%)		Rural (%)		Total (%)	
	1990	2015	1990	2015	1990	2015
Distribución domiciliaria	82	91	18	31	51	66
Otros sistemas mejorados	9	8	35	38	22	21
Sistemas tradicionales	8	1	32	25	19	10
Agua superficial	1	0	15	6	8	3

Fuente: OMS/UNICEF JMP, 2015 [5]

Tabla 2 Cobertura de sistemas de saneamiento en Nicaragua

	Urban (%)		Rural (%)		Total (%)	
	1990	2015	1990	2015	1990	2015
Instalación mejorada	60	76	26	56	44	68
Instalación compartida	8	10	3	7	6	9
Otras sin mejorar	27	12	27	23	27	16
Defecación expuesta	5	2	44	14	23	7

Fuente: OMS/UNICEF JMP, 2015 [5]

Evolución de la cobertura de sistemas mejorados de agua y saneamiento:

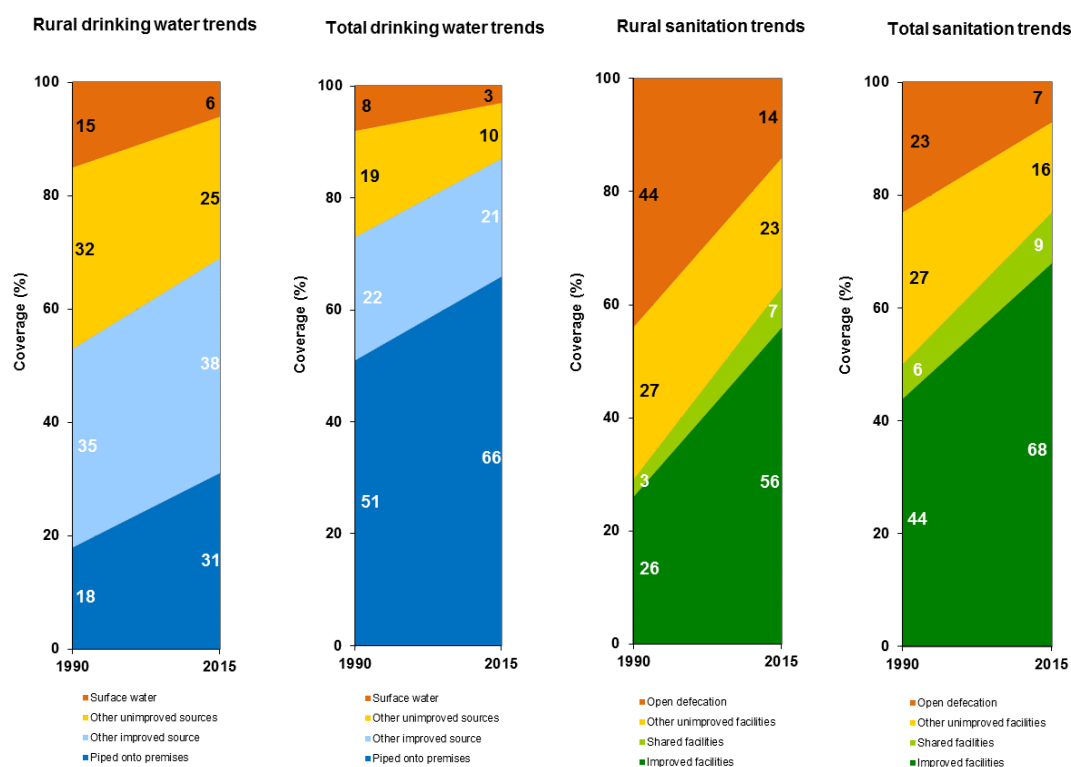


Figura 6 Evolución de la cobertura de sistemas mejorados de agua y saneamiento Fuente: OMS/UNICEF JMP, 2015 [5]

“Los niveles de acceso a servicios mejorados de abastecimiento de agua y saneamiento en Nicaragua son bajos en comparación con los estándares regionales. Sin embargo, desde 1990 se han logrado avances significativos en las zonas rurales, generados a partir de una base limitada. En las zonas rurales, el acceso a servicios mejorados tanto de abastecimiento de agua como de saneamiento ha aumentado significativamente.”

Cabe destacar que el nivel de acceso depende mucho de la definición aplicada. Por ejemplo, una encuesta del Programa de Agua y Saneamiento del Banco Mundial en 100 comunidades rurales en 2008 mostró que en estas áreas el acceso a instalaciones de saneamiento es de 82.5%, pero el acceso a instalaciones sin defectos es solamente 50.5%. Es interesante que ambas cifras muestran una diferencia en el acceso respecto a los datos recogidos en el Joint Monitoring Programme citado arriba. [5]

La entrega de servicios de abastecimiento de agua y saneamiento en Nicaragua en las zonas urbanas compete principalmente a una empresa nacional de servicios públicos: Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL). En las zonas rurales esto compete a los Comités de Agua Potable y Saneamiento (CAPS).

A pesar de contar con niveles de inversión relativamente altos, en los últimos años el acceso a los servicios de abastecimiento de agua en las zonas urbanas apenas ha podido mantener el ritmo del crecimiento poblacional. El acceso a servicios urbanos de saneamiento también ha declinado y, en ambos casos, la calidad del servicio no es suficiente. No obstante, en el ámbito rural se ha logrado un incremento sustancial en la cobertura de los servicios de abastecimiento tanto de agua como de saneamiento.

1.2.3 Marco jurídico e institucional

En el marco institucional del sector de agua y saneamiento de Nicaragua existe cierta discrepancia entre las atribuciones legales (de iure) de un lado y las atribuciones reales (de facto) del otro lado. También existen algunas ambigüedades entre varias leyes. Las responsabilidades inherentes al sector de agua y saneamiento en Nicaragua están definidas en las siguientes leyes y decretos: [6]

- *“Ley General de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario (Ley No. 297 de 1998)”*
- *“Decreto Ley No. 276 de 1998” (creación de ENACAL).*
- *“Decreto No. 51-98 (creación de CONAPAS).*
- *“Ley No. 275 de 1998” (transformó el INAA en un ente regulador).*
- *“Ley Municipal”*
- *“Ley General de Aguas Nacionales”*
- *“Ley 620”*
- *“Ley No. 722. (Ley especial de Comités de Agua Potable y Saneamiento)”*

Situación del jure

La responsabilidad por la formulación de políticas del sector nicaragüense de agua y saneamiento recae, según la ley, sobre la Comisión Nacional de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario (CONAPAS) como ente rector del sector. La CONAPAS incluye la Secretaría de la Presidencia, el Ministerio de Salud, el Ministerio del Medio Ambiente, la empresa de servicios públicos ENACAL, el ente regulador INAA, el Instituto de Estudios Territoriales (INETER) y el Fondo de Inversión Social de Emergencia (FISE).

El Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (INAA) es el ente regulador que está a cargo de la normativa del sector. Según la ley el INAA maneja las quejas del público, aprueba los incrementos a las tarifas y puede otorgar concesiones a los proveedores de servicios.

Según la ley municipal nicaragüense, las municipalidades son las responsables por la prestación de los servicios de agua y saneamiento. Sin embargo, ni la Ley General de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado, ni la Ley del ENACAL mencionan las municipalidades. Existe entonces una ambigüedad en el marco legal sobre la administración y propiedad de los sistemas de agua potable y alcantarillado entre las municipalidades y ENACAL.

Según un estudio del Programa de Agua y Saneamiento del Banco Mundial de 2008 el marco legal e institucional del sector es bastante completo, pero está más orientado hacia los temas relacionados con el agua potable: "Las leyes existentes de saneamiento están contenidas en una serie de instrumentos e instituciones que dispersan las responsabilidades. No existe un marco legal claro para el saneamiento." Además, la estrategia sectorial de agua y saneamiento elaborada a finales de 2005 no define un plan de acción específico para saneamiento. [4]

Situación de facto

En la práctica existe una falta de reconocimiento por parte de ENACAL de las entidades rectoras y reguladoras del sector. Estas son respectivamente la CONAPAS y el INAA. De facto el ENACAL actúa como ente rector y proveedor principal de servicios en el sector, mientras que la CONAPAS y el INAA carecen de recursos humanos, presupuesto y respaldo político para cumplir sus funciones. En el caso del ente regulador no se han presentado solicitudes de incrementos tarifarios desde 2003, ni tampoco solicitudes de concesiones. Por eso el ente regulador ha estado condenado a la inactividad.

De facto las siguientes instituciones son responsables de la provisión de servicios de agua y alcantarillado:

- Aproximadamente el 60% de los usuarios de agua son atendidos por la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL), la cual da servicio a casi todas las zonas urbanas.
- El 10% es atendido por las tres empresas departamentales de agua en Río Blanco, así como por 26 municipalidades pequeñas.
- El 30% de los usuarios, en las áreas rurales, es atendido por 5,200 organizaciones comunitarias (Comités de Agua Potable y Saneamiento, CAPS).

En 2000, existían en el país 3185 sistemas rurales de abastecimiento de agua registrados, de los cuales el 70% dependía de pozos. Hoy en día se estima un total de 5000. [7]

El Fondo de Inversión Social de Emergencia (FISE) provee el financiamiento para infraestructura y apoya a las comunidades locales en la gestión de dicha infraestructura. En el sector agua y saneamiento el FISE ha sido de facto el ente rector para las áreas rurales desde hace 2005.

Antes de 2005 ENACAL también apoyaba a las organizaciones comunitarias en zonas rurales y ha cosechado bastante éxito en este campo. Tanto la OMS como el Proyecto de Salud Ambiental financiado por EE.UU. han reportado altos niveles de sustentabilidad en la prestación de los servicios rurales de agua de los proyectos que han recibido el respaldo de la dirección rural de aguas de ENACAL.

El 9 de septiembre de 2007 se promulgó la Ley General de Aguas Nacionales en Nicaragua, lo que constituye la ley de recursos hídricos más reciente en los últimos 31 años en la región centroamericana. Esta ley trata de la gestión de los recursos hídricos y no directamente de agua potable y saneamiento. La ley provee la creación de un Consejo Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) como la instancia de más alto nivel para la gestión de recursos hídricos, una Autoridad Nacional de Aguas (ANA) y organismos de cuencas. Provee también la creación de un Fondo Nacional de Agua (FNA) para financiar un Plan Nacional de Recursos Hídricos y planes por cuenca. El Fondo será alimentado, entre otros, a través del pago de un canon para el uso de agua. El canon será establecido mediante una otra ley específica. [4]

Otras instituciones

La Red de Agua y Saneamiento de Nicaragua (RASNIC) es una plataforma donde convergen instituciones del gobierno, agencias de cooperación, ONG, asociaciones, alcaldías, entre otros, con la finalidad de promover discusiones informadas que permitan a los tomadores de decisiones mejorar sus políticas públicas, además de fortalecer a los actores a través de capacitaciones y transferencias de tecnologías.

Historia y eventos recientes [6]

Durante el gobierno de Somoza y hasta 1979, el sector privado operaba los grandes sistemas urbanos de abastecimiento de agua, mientras que un departamento Ministerial estaba a cargo de los sistemas de agua en las ciudades más pequeñas. Tras la revolución Sandinista se creó el Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (INAA), una empresa pública y centralizada.

Las reformas de 1998 y dificultades en su implementación

En 1990, después de la derrota electoral de los Sandinistas, los gobiernos subsecuentes emprendieron acciones en un intento por desconcentrar y descentralizar la empresa nacional de servicios públicos a fin de alcanzar la autosuficiencia e incrementar la participación del sector privado. En 1998, bajo la administración de Arnoldo Alemán, se realizó una reforma del sector a fin de separar las funciones normativas, de formulación de políticas y de prestación de servicios:

- Se creó CONAPAS como ente encargado de la formulación de políticas.
- Se creó ENACAL como proveedor de los servicios, acaparando gran parte del personal y de los activos del INAA.
- Se creó un nuevo ente regulador que heredó el nombre INAA.

El sector no experimentó ningún avance considerable hacia la descentralización o hacia la participación del sector privado ni antes de la reforma de 1998 ni después. La autosuficiencia financiera de ENACAL mejoró entre los años 1998 y 2001, pero se suscitaron manifestaciones públicas de protesta en contra del alza en las tarifas. Posteriormente y durante la administración de Enrique Bolaños (2002-2007) se congelaron las tarifas, lo que llevó al gradual deterioro de la situación financiera de la empresa de servicios públicos.

Moratorio sobre la privatización

En 2003, la Asamblea Nacional Nicaragüense aprobó una moratoria sobre cualquier privatización del agua “hasta que se apruebe una ley nacional de aguas”. Dicha ley se aprobó en septiembre de 2007. [4]

Estrategia sectorial de 2005

En octubre de 2005, CONAPAS aprobó una estrategia sectorial dirigida, nuevamente, hacia la descentralización, la autosuficiencia financiera y al fortalecimiento del ente regulador. Dicha estrategia propone también el desarrollo de un modelo de operación sostenible para las zonas rurales. A principios de 2006, ENACAL, como parte de su proceso de modernización, suscribió un contrato de servicios de cinco años para la prestación de servicios comerciales (lectura de medidores, facturación, servicio al cliente), que contó con el apoyo del BID. [4]

El gobierno sandinista desde 2007

El gobierno Sandinista de Daniel Ortega, electo en noviembre de 2006, no ha definido aún su política sectorial. Sin embargo, se opone a la participación del sector privado y ha expresado una postura crítica en contra de las regulaciones autónomas. Una de las opciones consideradas por el gobierno es el establecimiento de una Autoridad Nacional de Aguas.

En enero de 2007, CONAPAS puso en marcha un plan integral de agua y saneamiento de diez años. Este plan proyecta inversiones de 592 millones de dólares y se concentrará en las zonas rurales utilizando al FISE como dependencia ejecutora. [4]

Aspectos financieros, tarifas y subsidios

Las tarifas urbanas de agua y alcantarillado que cobra ENACAL experimentaron un incremento sustancial en el período 1998-2001, con alzas anuales de 28, 27 y 12% en 1998, 1999 y 2000, respectivamente. Incrementos tan altos e ininterrumpidos como éstos no eran comunes en la región. Mientras que estas alzas le permitieron a la empresa recobrar su estabilidad financiera, en el año 2001 desembocaron en protestas y en acciones legales en rechazo de otro 30% de alza en la tarifa.

Desde 2003, las tarifas han sido congeladas en términos nominales. Nuevamente, esto ha erosionado la estabilidad financiera de ENACAL llevándola al borde de la quiebra, por lo que a partir de 2005 se requirió de transferencias financieras para cubrir sus pérdidas de operación.

En agosto de 2008 INAA aprobó un incremento de las tarifas de ENACAL de 42% en Matagalpa y de 40% en Jinotega. El incremento no ha sido revelado al público, según el periódico El Nuevo Diario. Las tarifas de ENACAL son complejas y, ostensiblemente, intentan proteger a los pobres. Las tarifas varían según:

- Ciudad (por razones un tanto confusas, son aproximadamente un tercio más bajas en Managua que en el resto de las ciudades).
- Categoría de usuario (tres categorías de usuarios residenciales e “instituciones”, que pagan las tarifas más altas; entre las categorías de usuarios residenciales, la relación entre la tarifa más baja y la más alta es de 1:3).
- Consumo (tarifas más altas al consumo por superar los 20 y 50 metros cúbicos al mes, respectivamente).

A pesar de que, en general, los subsidios probablemente no son muy altos debido a los altos niveles tarifarios, los pobres, que no tienen acceso a los servicios de agua y saneamiento, o que son atendidos por comités rurales de agua, por definición están excluidos de estos subsidios.

Se ha estimado que, en el interior del país, la familia promedio ubicada en los dos quintiles inferiores de ingreso y usuaria de los servicios de agua de ENACAL, pagaba el equivalente a 6.50 dólares mensuales en 2003, lo que corresponde al 7% de su ingreso estimado de 93 dólares al mes. A pesar de que esta proporción es muy alta, la factura probablemente es menor que el costo económico del tiempo dedicado a acarrear agua y de la incidencia de enfermedades causadas por agua insegura. [4]

Inversiones y financiamiento

Según la Unidad Pública de Inversiones, las inversiones en el sector agua y saneamiento durante el período 1991-2006 ascendieron a 351 millones de USD, o a un promedio de más de 22 millones de USD al año. Esto corresponde al 0.49% del PIB o a 4.5 USD /cápita/año. Desde 1997, el nivel de inversiones aumentó de manera notable. Mientras que entre 1991 y 1996, la inversión anual oscilaba entre sólo 0.7 USD y 1.1 USD per cápita, entre 1997 y 2006 subió a 4.7 USD a 9.4 USD. Entre 1997 y 2003, el nivel promedio de inversión per cápita fue más alto que en los países vecinos Honduras y Costa Rica, pero más bajo que en países sudamericanos, como Argentina, Perú y Colombia.

Las inversiones, casi en su totalidad, son financiadas por donantes extranjeros. El gobierno entrega créditos extranjeros, bajo la modalidad de donaciones, a ENACAL y a los comités de agua potable en las zonas rurales. En contraste, de los 215 millones de USD invertidos por la empresa nacional de agua en 1990-1999 (24 millones de USD a precios nominales), el 16% fue autofinanciado por la empresa, el 7% fue financiado por el gobierno con sus propios recursos, y el saldo fue financiado por donantes extranjeros. [8]

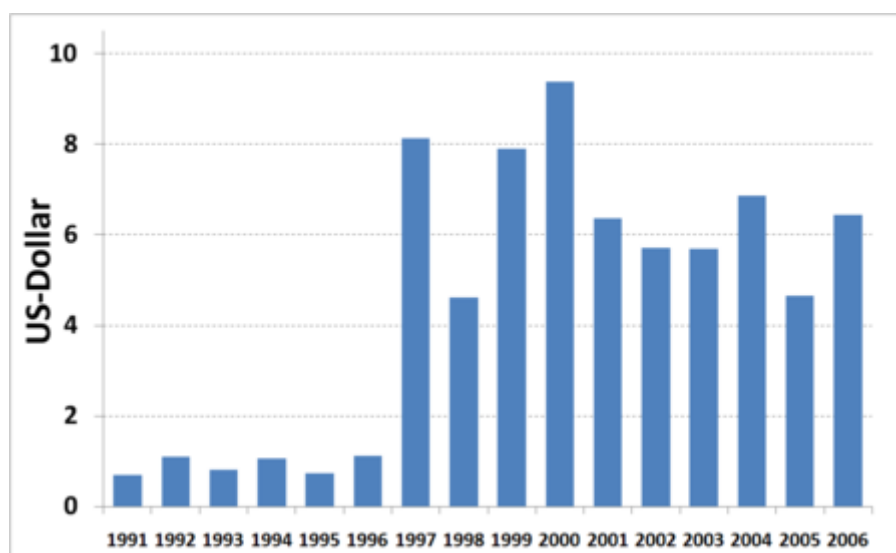


Figura 7 Inversión extranjera en infraestructura de agua y saneamiento. Fuente: [8]

No existen datos sobre las inversiones realizadas por las ONGD's, las cuales proporcionan fondos destinados, principalmente, a proyectos de infraestructura en zonas rurales.

La eficiencia asociada a la prestación de servicios urbanos es baja, con niveles estimados de agua no facturada de más de 56% y una productividad laboral de 7.6 empleados por cada 1,000 conexiones de agua, más del doble del nivel que se considera una buena práctica.

1.3 Comités de Agua Potable y Saneamiento (CAPS)

Los Comités de Agua Potable y Saneamiento, CAPS, son la entidad encargada del manejo de los sistemas de abastecimiento de agua en comunidades rurales de Nicaragua. Su papel es clave en este estudio, por lo que se procederá a una descripción detallada de los mismos. Es clave para su entendimiento la “Ley No. 722”. (Ley especial de Comités de Agua Potable y Saneamiento), la cual supone el marco legal de los CAPS y define su funcionamiento interno y funciones. La siguiente información ha sido elaborada por AECID [9]:

“Los CAPS se definen como organizaciones sin fines de lucro que, de manera voluntaria, y electos democráticamente, tienen a su cargo la administración, operación y mantenimiento del servicio de agua potable y saneamiento en la comunidad, con el apoyo de todos los usuarios, a quienes, además, rinden cuentas de sus gestiones y actividades.” (Arto 6, Ley 722)



Miembros del CAPS de “El Lagartillo” Fuente: Autor

Breve reseña histórica y datos relevantes

La presencia de CAPS en Nicaragua se remonta a las décadas de los años 60s y 70s, cuando surgieron las primeras expresiones de organización comunitaria para gestionar la infraestructura básica de agua potable, que generalmente consistía de un pozo público excavado a mano.

Posteriormente en la década de los años 80s se impulsaron diferentes formas de organización y autogestión comunitaria, que sentaron las bases para que en los años 90s, los CAPS fueran reconocidos y promovidos por las instituciones y organizaciones ejecutoras de proyectos de agua potable y saneamiento rural, como las entidades que se encargarían del mantenimiento y administración del sistema comunitario, una vez concluido el proyecto.

Las instituciones y organizaciones establecieron procedimientos para guiar la conformación de los CAPS en las comunidades y programas de capacitación. Muchos de estos esfuerzos fueron retomados en el contenido de la Ley 722.

En la actualidad se estima que existen alrededor de 5,200 CAPS en Nicaragua que, en conjunto, trabajan para garantizar el derecho humano al agua y saneamiento a **2 millones de personas** en el país. Se concentran principalmente en las áreas rurales, aunque también se encuentran organizados en barrios periurbanos. [9]

Participación de los CAPS en las etapas iniciales de un proyecto de agua potable

La participación de los líderes y lideresas de los CAPS se suele iniciar cuando la comunidad se organiza para solicitar un proyecto de agua potable y saneamiento. Esta demanda se realiza a las autoridades municipales durante las consultas del presupuesto, pero también puede realizarse a otras instancias como el gobierno central u ONGDs con presencia en la zona.

En algunos casos pueden pasar muchos años o incluso décadas con una solicitud pendiente de respuesta. Mientras, las comunidades suelen buscar estrategias para abastecerse de agua a través de infraestructura rudimentaria como pozos excavados a mano o captaciones en manantiales, en definitiva, sistemas tradicionales.

Posteriormente se inicia la construcción de un proyecto de agua potable en la comunidad y se convoca a la Asamblea General de Pobladores, cuyos representantes participan en la toma de decisiones y aprueban el diseño del sistema de agua potable.

En esta etapa generalmente se elige un Comité Técnico de Seguimiento (CTS), que es una especie de CAPS transitorio, compuesto por personas voluntarias que reciben capacitación y participan en el proceso de la obra.

Cada familia de la comunidad aporta mano de obra para la construcción del sistema de agua potable, y en ocasiones, dinero en efectivo.

Los Comités de Agua Potable y Saneamiento se organizan formalmente en las comunidades cuando ya se ha construido un sistema de agua potable. La estructura mínima del CAPS es la siguiente:

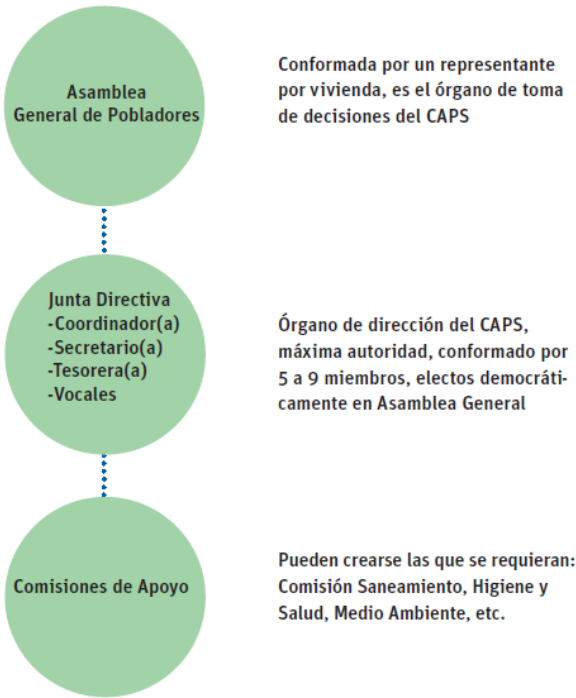


Figura 8 Estructura de un CAPS. Fuente: [9]

Administración del Sistema de Agua Potable

La gestión comunitaria del agua comprende una gran cantidad de actividades que deben ser llevadas a cabo en su mayoría por las personas que son miembros de la Junta Directiva.

La acción colectiva que llevan a cabo los CAPS implica reuniones constantes entre algunos miembros o la Junta Directiva en pleno, y también la celebración de asambleas generales. Todas las reuniones y acuerdos son registradas por el secretario(a) del CAPS en un libro de Actas.

Las personas que conforman los CAPS realizan este trabajo de manera voluntaria, aunque en algunos casos se suele remunerar algunas tareas como la fontanería o la lectura de los medidores.

Tarifas y Cobranza del Servicio de Agua Potable

Toda la gestión que realizan los CAPS depende de los fondos que se logran obtener a partir del pago por el servicio de agua potable que realizan las familias usuarias. En este sentido, es esencial la definición de una tarifa que alcance a cubrir los costes de operación y mantenimiento del sistema. Además, debe permitir alimentar un fondo de ahorro para gastos eventuales, como reparaciones y reemplazo de componentes.

Las tarifas son aprobadas por la Asamblea General de Pobladores, tomando en consideración la capacidad de pago de las familias usuarias. En los sistemas de agua potable que cuentan con medidores ubicados en las conexiones domiciliarias, las tarifas se establecen en función de la cantidad de agua consumida. En cambio, en los sistemas donde no existen medidores, se define una tarifa fija aplicable a todas las viviendas.

Por lo general los CAPS establecen tarifas para el servicio de agua potable que son asequibles para las familias que atienden; sin embargo, en algunos casos (principalmente en Mini Acueductos por Bombeo Eléctrico (MABE)) las tarifas que se establecen pueden llegar a ser incluso mayores que las aplicadas a las viviendas en las ciudades.

Un señalamiento frecuente que realizan los líderes y lideresas de los CAPS suele ser un alto nivel de morosidad en relación al pago del servicio de agua en las comunidades. Generalmente lo asocian a la falta de priorización de este gasto en el presupuesto familiar.

Los CAPS tienen que registrar y actualizar sus ingresos y gastos en un libro diario que es proporcionado por el Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillado (INAA) y elaborar un resumen financiero mensual. Esta documentación ha de ser presentada de forma periódica a la Dirección General de Ingresos (DGI).

Según la Ley 722, los CAPS deben contar con un registro de usuarios o base de datos de las familias usuarias del sistema, donde se reporta el tipo de tarifa aplicable y cualquier incidencia, cortes, reconexiones, etc.

Los CAPS establecen mecanismos para la rendición de cuentas. Semestralmente se celebran asambleas generales en las cuales se demuestra a las familias el balance de cuentas del CAPS y se informa de las principales actividades desarrolladas en el período. Generalmente se muestra algún tipo de documentación como las libretas de ahorros del banco o cooperativa donde se resguarda el fondo de ahorro. [9]

Plan de Operación y Mantenimiento

Las actividades que realizan los CAPS de operación y mantenimiento dependen del tipo de sistema de abastecimiento de agua potable y la variación en sus componentes. Generalmente existe una persona encargada que es capacitada para llevar a cabo la labor de operación y mantenimiento, en ocasiones es un miembro de la Junta Directiva o Comisión de Apoyo, y en otros casos es una persona de la comunidad a quien se le remunera su trabajo.

Respaldo Legal e Institucional. Ley 722

A pesar de que los CAPS operan en comunidades rurales y periurbanas del país desde hace varias décadas, hasta 2010 no gozaron de un reconocimiento legal, a través de la publicación de la Ley 722, Ley Especial de Comités de Agua Potable y Saneamiento.

La Ley 722 establece los procedimientos y normas para la organización, constitución, legalización y funcionamiento de los CAPS. Se brinda la posibilidad de abrir cuentas bancarias, adquirir bienes y propiedades y legalizarlas a su nombre, así como firmar convenios de colaboración con entidades públicas y privadas, asociarse entre sí o con otras figuras jurídicas.

Por otro lado, la Ley 722 también define un régimen económico y fiscal aplicable a los CAPS, y otros beneficios como la exoneración de impuestos y una tarifa de energía eléctrica preferencial para los CAPS MABE (Mini Acueducto de Bombeo Eléctrico).

Otras instituciones y su relación con los CAPS

INAA	Autoridad de aplicación Ley 722. Emite normativas y procedimientos que regulan a los CAPS. Promueve capacitación y asistencia técnica. Establece mecanismos de coordinación con otras instituciones.
UMAS	Brinda asistencia técnica y acompañamiento a los CAPS en aspectos legales, organizativos, administrativos y técnicos. Apoya el cumplimiento de las normativas y requisitos de la Ley 722.
ENACAL	Colabora en la asistencia sobre aspectos de operación y mantenimiento de los sistemas de agua potable a demanda.
MINSA	Realiza monitoreo de calidad de agua, en algunos casos proporciona cloro y realiza capacitaciones sobre promoción de higiene y saneamiento. La Red de Brigadistas de Salud guarda relación y coordinación con los CAPS en las comunidades.
FISE	Brinda capacitación a las UMAS para atención a los CAPS. Organiza y capacita a los CAPS durante la ejecución de los proyectos de agua y saneamiento rural, a través de la contratación de firmas sociales.

Los CAPS en Nicaragua están organizados en redes locales (municipales y departamentales) y a su vez, articulados en una Red Nacional, conocida como RED CAPS. En el año 1990, miembros de los CAPS de los municipios de Matagalpa y Jinotega, iniciaron discusiones en torno a las amenazas de privatización del servicio de agua potable, que se habían suscitado en el marco de la elaboración de los primeros borradores de la Ley General de Aguas.

Este movimiento en el cual se involucraron los CAPS y ONGDs nicaragüenses, logró que en el proyecto de Ley General de Aguas finalmente aprobado se incluyera un reconocimiento del derecho humano al agua y se evitara su privatización. Esto sentó las bases para una organización nacional de CAPS, y surgieron redes locales de CAPS en otras regiones del país.

La RED CAPS ha continuado promoviendo acciones para obtener reconocimiento y mejores condiciones para su membresía, lo cual resultó en la promulgación de la Ley 722, Ley Especial de CAPS.

Recientemente la RED CAPS se ha constituido como una Asociación sin fines de lucro cuya misión está centrada en brindar apoyo a los CAPS asociados y aliados, promoviendo el desarrollo y participación organizada de los miembros de las comunidades rurales y contribuyendo activamente en la conservación de las fuentes de agua, la mejora de las condiciones de higiene comunitaria y la calidad sanitaria del agua suministrada por los CAPS, así como promover una relación equitativa de género en el ámbito de los CAPS.

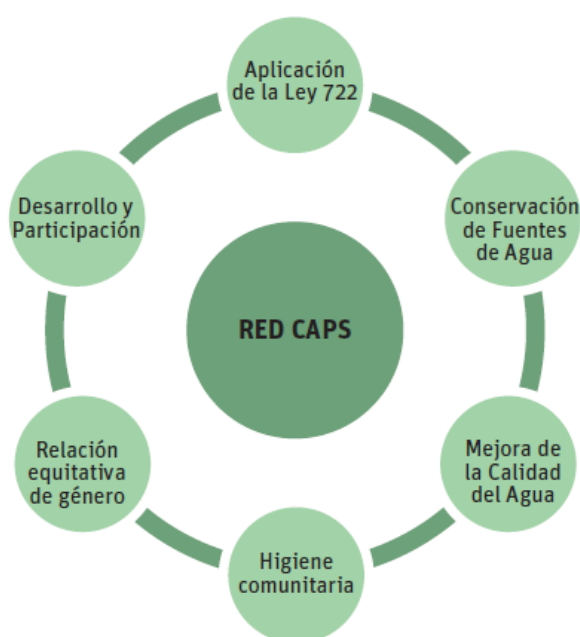


Figura 9 Red de Comités de Agua Potable y Saneamiento. Fuente: [9]

1.4 Cooperación internacional en Nicaragua

En Nicaragua se han realizado multitud de proyectos de agua potable y saneamiento en los últimos años, tanto por parte del gobierno como por otros agentes externos en diferentes modos de cooperación. La cooperación española siempre ha estado muy presente en Nicaragua, tanto a través de AECID como de diferentes ONGD's y fundaciones.

AECID



La Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) tiene presencia en Nicaragua desde hace 25 años. A través de su Oficina Técnica de Cooperación, acompaña los esfuerzos del Gobierno de Nicaragua, así como de sus instituciones públicas y privadas en la reducción de la pobreza.

Nicaragua está considerado país de asociación amplia por la AECID y es el tercer receptor de Ayuda Oficial para el Desarrollo (AOD) española a nivel mundial. España ha trabajado con diversos instrumentos de cooperación en programas y proyectos, acompañados por las actuaciones de ONGD's, Comunidades Autónomas, Entidades locales, Universidades, Programas de microcréditos, Programa de becas, Programa de Conversión de Deuda, además de Fondos Municipales, numerosos hermanamientos municipales y convenios universitarios, entre otros. En el extenso tejido de relaciones humanas, destaca el papel de miles de cooperantes y voluntarios españoles que dedican su trabajo al desarrollo de este país.

AECID ha trabajado en la Gobernabilidad Democrática, el Desarrollo Rural y Lucha contra el Hambre, Servicios Sociales Básicos en lo que refiere a: Educación, Salud y Agua; el Crecimiento Económico para la Reducción de la Pobreza, la Sostenibilidad Ambiental, la Cultura y Desarrollo, el Género en Desarrollo y la Ayuda Humanitaria.

La Cooperación española ejecuta proyectos de agua potable y saneamiento con instituciones nacionales, ONGD's españolas y locales. Su trabajo se centra en zonas del país donde se carece infraestructura de abastecimiento de agua, como parte del Fondo de Cooperación de Agua y Saneamiento.

El "Proyecto de Desarrollo Integral del Barrio Acahualinca" es el proyecto insignia de la Cooperación Española. Fue ejecutado con la Alcaldía de Managua y consistió en el sellado del vertedero "La Chureca", considerado el vertedero de basura más grande a cielo abierto de Centroamérica. Incluyó la construcción de una planta procesadora de residuos sólidos y urbanos, la entrega de 258 viviendas a igual número de familias que vivieron en la extrema pobreza durante 40 años, un puesto de salud, centro cultural comunitario, escuela, sub delegación policial, áreas de recreación y diversidad de beneficios sociales. [10]

Actualmente AECID lidera el Programa Integral Sectorial de Agua y Saneamiento Humano (PISASH) que será descrito a continuación.

En el siguiente enlace se puede acceder a todos los proyectos de agua potable y saneamiento ejecutados en Nicaragua recogidos por AECID:

Proyectos de agua potable y saneamiento en Nicaragua: [link](#)

El Programa Integral Sectorial de Agua y Saneamiento Humano (PISASH) comprende el esfuerzo conjunto entre el gobierno nacional y organismos de cooperación con el fin de mejorar la cobertura de los servicios de agua potable y saneamiento en 19 ciudades de Nicaragua. Al mismo tiempo pretende generar un nuevo escenario donde estos sean gestionados con calidad, eficiencia y de manera sostenible. Este programa, liderado en su coordinación por AECID, representa la modalidad de financiación LAIF de la Unión Europea.

El PISASH espera beneficiar a 600.000 personas con el servicio de agua potable y a 235.000 personas con el servicio de alcantarillado sanitario. En él participan la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), a través del Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento (FCAS) y el Programa de Conversión de Deuda España – Nicaragua, la Unión Europea a través de la iniciativa Latin American Investment Facility (LAIF), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE), el Banco Europeo de Inversión (BEI) y el Gobierno de Nicaragua.

La AECID tiene un papel clave de enlace entre los diferentes organismos de cooperación externa, el Gobierno de Nicaragua, la empresa pública ejecutora ENACAL, y el resto de actores dentro del engranaje institucional y técnico.

Esto se debe al firme compromiso de la Cooperación Española que desde el año 2007 ha apoyado y contribuido con Nicaragua con más de 22 intervenciones en el sector de agua y saneamiento, a través de diferentes instrumentos de cooperación tanto el ámbito rural como en el urbano.

El PISASH en una primera fase de ejecución (2014 – 2019) cuenta con un fondo de 343 millones de dólares y pretende proveer de agua potable y saneamiento a 19 ciudades en Nicaragua. Las obras son supervisadas por la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados Sanitarios (ENACAL). La ejecución de la primera fase del PISASH representará el aumento en la cobertura de los sistemas de agua potable del 67 % actual al 95 %, y de los servicios sanitarios del 18 % actual al 55 % hacia el año 2019. [11]

En los siguientes enlaces se puede obtener más información acerca de los diferentes programas implementados en Nicaragua como parte del PISASH en distintas zonas del país:

NIC-013-B http://www.fondodelagua.aecid.es/galerias/fcas/descargas/proyectos/informe-situacion-junio-2013/NIC-013-B_201512_FIVISIB_201603.pdf

NIC-014-B http://www.fondodelagua.aecid.es/galerias/fcas/descargas/proyectos/informe-situacion-junio-2013/NIC-014-B_201512_FIVISIB_201603.pdf

NIC-056-M http://www.fondodelagua.aecid.es/galerias/fcas/descargas/proyectos/informe-situacion-junio-2013/NIC-056-M_201512_FVISIB_20160524.pdf



El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo es uno de los principales actores en la cooperación nicaragüense, pero, cómo se mencionó al hablar de la realidad política del país, el gobierno del FSLN, presidido por Daniel Ortega, acusó al Plan de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) de una actitud intervencionista en el estado. Esto ha entorpecido de gran manera las relaciones actuales entre el PNUD y el gobierno nicaragüense.

Uno de los principales proyectos de agua potable y saneamiento comenzó en diciembre de 2011 bajo el nombre: “Enfoque territorial contra el cambio climático, medidas de adaptación y reducción de vulnerabilidades en la región de Las Segovias”. Dicho proyecto se encuentra financiado por la Cooperación Suiza para Centro América e implementado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en coordinación con alcaldías locales, el Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA) y el organismo Acción Contra el Hambre.

Este proyecto se ejecuta en tres departamentos territoriales de Nicaragua: Estelí, Madriz y Nueva Segovia. Cuenta con un presupuesto de 3.382.000.00 USD otorgados por la Cooperación Suiza para América Central y fondos regulares del PNUD. Su objetivo es contribuir a la reducción de la pobreza, aumentando la resiliencia de la población vulnerable y de sus medios de vida frente al cambio climático.

Aproximadamente 6.100 personas han sido beneficiadas con la implementación de medidas de adaptación al cambio climático en tres microcuencas priorizadas: obras para cosecha de agua, sistemas agroforestales, bancos de semilla y acueductos comunitarios, y fortalecimiento de capacidades. Se han construido 11 obras de protección ante inundaciones, como puentes vados, sistemas de drenaje pluvial y muros de protección de riberas.

En los procesos de fortalecimiento de capacidades locales se ha formado a más de 2.000 personas en gestión de riesgos, resiliencia, causas del cambio climático, efectos y medidas de adaptación.

La metodología impulsada en las capacitaciones es “aprender haciendo”, lo cual ha permitido contribuir con la sostenibilidad del medio ambiente y posicionar a este proyecto como referente para ser replicado en otras zonas del país.

Los gobiernos locales y asociaciones de municipios trabajaron en la elaboración de estrategias de adaptación al cambio climático y su inserción en los procesos de planificación territorial. Las universidades de la zona también apoyaron el proceso, incluyendo el tema en los planes de estudios.

El Grupo Impulsor de Saneamiento Integral, integrado por RASNIC, PAS del Banco Mundial, Servicio Cooperación Holandesa, COSUDE (Suiza), UNICEF, OPS, y Fundación Sodis, organizó un proceso de consulta sobre el estado del saneamiento en seis regiones (Matagalpa-Jinotega, Estelí-Madriz-Nueva Segovia, León-Chinandega, Boaco-Chontales, Río San Juan y la Región Autónoma del Atlántico Norte) que culminó con un foro nacional en 2007 para abordar la importancia del saneamiento en el país.

Los distintos donantes que brindan apoyo al gobierno de Nicaragua en sus esfuerzos por mejorar el abastecimiento de agua y el saneamiento, se coordinan a través de una mesa sectorial y en 2005 se suscribieron a un Enfoque Sectorial Amplio (SWAP, por sus siglas en inglés) para coordinar aún mejor sus esfuerzos. [12]

Fundación Ecología y Desarrollo - ECODES se constituyó en Zaragoza en marzo de 1992 y es uno de los agentes más activos en la cooperación nicaragüense, especialmente en materia de agua y saneamiento. Trabaja en 9 países en los que ha gestionado más de 170 proyectos de cooperación y cuenta con 36 personas contratadas en España, Perú y Nicaragua.

ECODES ha realizado múltiples proyectos de agua potable y saneamiento en Nicaragua, incluyendo la construcción de Sistemas de Bombeo Fotovoltaico (SBFV) o, como son conocidos en Nicaragua, Mini Acueductos de Bombeo Eléctrico (MABE). Uno de los sistemas objeto de estudio de este proyecto fue desarrollado e implementado por ECODES en la comunidad de “El Lagartillo”, Achuapa (León).

En el año 2006 nace la Alianza por el Agua de la mano de la Fundación Ecología y Desarrollo (ECODES), que ha sido su impulsora, junto a los siguientes socios fundadores: la AECID (Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo); el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente; la oficina para los Objetivos de Desarrollo del Milenio de Naciones Unidas y Expo-Zaragoza 2008.

En estos años se han sumado a esta enorme red más de 330 organizaciones de España y Centroamérica pertenecientes a distintos sectores vinculados al agua y el saneamiento. [13]

La Alianza por el Agua realiza proyectos de cooperación en el ámbito del acceso a agua potable y el saneamiento básico. Para ello cuenta con una Convocatoria de Pequeños Proyectos de Interés Comunal dirigida a entidades no gubernamentales socias de la iniciativa para la construcción y/o mejora de las infraestructuras de agua y saneamiento en los ámbitos rural y periurbano de los países centroamericanos. En el siguiente enlace se puede acceder a más información sobre algunos proyectos desarrollados en Nicaragua:

Alianza por el agua: [link](#)

Además, pone también a disposición de todas aquellas entidades interesadas en colaborar con países en vías de desarrollo y en mejorar los accesos de agua y saneamiento, un Banco de Proyectos de cooperación en Centroamérica para la financiación total o parcial de intervenciones.

Otro de los agentes principales en materia de abastecimiento de agua mediante sistemas de bombeo fotovoltaicos es la empresa nicaragüense Tecnosol. Tecnosol es una empresa privada que se dedica a promover el uso de la energía renovable, principalmente la energía solar. Su papel fundamental es el diseño, consultoría, suministro, instalación, capacitación y mantenimiento de equipos de energía renovable.

Tecnosol trabaja internacionalmente en la región centroamericana en diferentes proyectos y cuenta con sucursales en El Salvador, Panamá y Honduras. En 2010 ejecutó un proyecto en El Salvador para electrificar 500 viviendas y otro en Panamá, electrificando 1063 viviendas, 10 escuelas y 2 centros de salud. En un proyecto posterior en Honduras (2014-2015) ejecutó la electrificación de 6000 viviendas del ámbito rural.

Fundada en 1998, Tecnosol cuenta con 19 años de experiencia en el sector de las energías renovables y ha ejecutado multitud de proyectos con éxito en Nicaragua. Algunos de estos ejemplos son la instalación de 81 sistemas solares en centros de salud (2001), la electrificación de 1500 viviendas en la zona del Río Coco (Departamento de Madriz) o la capacitación de jóvenes del entorno rural para el manejo de sistemas solares instalados en sus comunidades.

Cuenta con diferentes aliados estratégicos tanto a nivel nacional como internacional, dada su posición de liderazgo en el mercado regional. Algunos de estos son “NTR Foundation”, el “Banco Mundial”, “Micro Energy International” y diversas entidades bancarias presentes en Centroamérica. [14]

En la instalación de sistemas de bombeo fotovoltaico generalmente trabajan con la familia “SolarPak” del fabricante “Franklin Electric”

El proceso que sigue Tecnosol para la ejecución de sus proyectos es el siguiente:

- Un asesor de ventas se pone en contacto para saber la necesidad.
- Se presenta una Pre-Oferta donde se indica los equipos a utilizar y un presupuesto aproximado según el sistema de interés.
- Se realiza una visita técnica al sitio de la instalación para determinar la cantidad y costo de otros materiales a utilizar y el costo de la instalación.
- Se presenta Oferta Final para ser aprobada.
- Se procede a realizar la instalación en el sitio.
- Se entrega el sistema funcionando y se realiza capacitación sobre el uso del mismo.

2. SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

2.1 Estructura de la sección

En esta sección del documento se abordarán los diferentes tipos de sistemas de abastecimiento de agua potable presentes en el ámbito rural nicaragüense.

En primer lugar, se explica la diferencia entre sistemas tradicionales y mejorados. Posteriormente, en lo correspondiente a los sistemas mejorados, se procede a la descripción de los diferentes elementos mejorables del sistema. En este documento sólo se han tenido en cuenta las soluciones adoptadas por las comunidades analizadas. Existen múltiples tecnologías de mejora de sistemas de abastecimiento de agua potable que no aparecen reflejadas en este documento.

Con objetivo de situar al lector en un cierto nivel de conocimiento relativo a la generación fotovoltaica, se recoge en este documento una introducción a dicha tecnología, sus principales parámetros de funcionamiento y su comportamiento en diferentes condiciones de trabajo. El motivo de profundizar tanto en este apartado es debido al complejo papel que desempeña la tecnología fotovoltaica en sistemas de bombeo.

En el apartado de bombeo fotovoltaico podemos distinguir dos secciones: la descripción de los diferentes sistemas y elementos y el protocolo de dimensionamiento. Es importante destacar que los sistemas estudiados en las dos comunidades rurales son muy diferentes en su naturaleza, pues nos encontramos con un caso de bombeo directo y otro con sistema de respaldo.

El dimensionamiento de un sistema fotovoltaico contiene todo el cuerpo científico para el estudio de estos sistemas y permite una modelización de estos. Para el posterior estudio de los casos reales se emplearán los métodos y ecuaciones definidos en el dimensionamiento de los sistemas.

2.2 Sistemas tradicionales de abastecimiento de agua

En general, un sistema de abastecimiento de agua es un conjunto de actividades o mecanismos técnicos que en conjunto abastecen a una comunidad. En toda comunidad existen sistemas de abastecimiento de agua de mayor o menor grado de desarrollo tecnológico.

Se pueden distinguir tres partes principales en el proceso:

- Recolección
- Transporte
- Almacenamiento en casa

En la mayoría de los casos, la comunidad toma el agua de fuentes tales como: pozos excavados a mano, quebradas, ríos, ojos de agua, manantiales, etc.

El agua se recolecta generalmente en ollas de barro, bidones, garrafas, botellas, etc. La mayoría de este trabajo recae en las mujeres y los niños de la comunidad. Ellos son los encargados de transportarla hasta la casa a pie o con ayuda de animales tales como burros, caballos e incluso carretas.

Una vez en la casa, donde es almacenada y posteriormente consumida. Existen múltiples formas de almacenamiento de agua en los hogares, desde recipientes cerámicos tradicionales hasta grandes tanques de almacenamiento, especialmente en zonas agrícolas.

En estos sistemas no se realiza ningún tipo de tratamiento al agua de consumo, con las graves consecuencias que puede acarrear a los miembros de la comunidad. En algunos casos se emplean sistemas de filtrado caseros para el agua de consumo, pero no existe cloración.

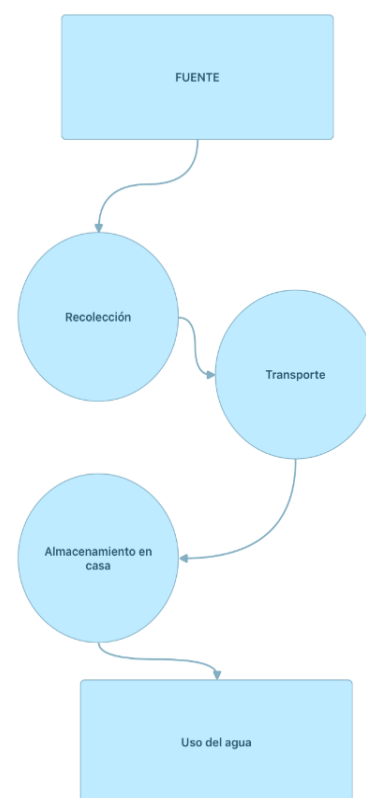


Figura 10 Sistemas tradicionales. Fuente: Autor



Transporte de agua tradicional en comunidades rurales, humano y animal.

A este conjunto de actividades que las personas de la comunidad realizan para obtener el agua es lo que llamaremos “Sistemas Tradicionales”. A continuación, se muestra un ejemplo de evaluación de un sistema tradicional por parte de la comunidad: [15]

Tabla 3 Ejemplo real de autoevaluación de una comunidad hondureña en octubre de 1992 [15]

SISTEMA TRADICIONAL		
FUENTE	<ul style="list-style-type: none"> -Pozo excavado a mano -Quebrada -Arroyo 	<ul style="list-style-type: none"> -El agua es muy poca, hay que hacer fila en el verano - Agua sucia, los animales beben en ella, agarra lama - En el verano se acorta el agua en los pozos - Mal sabor - Color 'zarca' (turbia) - Llueve muy poco y se secan los ríos
RECOLECCIÓN	<ul style="list-style-type: none"> -Baldes -Barril -Porras -Tambos 	<ul style="list-style-type: none"> - No se aprovecha toda el agua del arroyo y la quebrada - Se pierde tiempo - Hay que hacer varios viajes - Hay que ir largo a recogerla - Las porras pesan mucho (cinco galones cada una)
ACARREO	<ul style="list-style-type: none"> - Mujeres - Carretas - Caballos - Bueyes - Cabros 	<ul style="list-style-type: none"> -Se pierde tiempo que se puede utilizar en otras actividades - No se aprovechan los animales para arar, acarreo de granos, etc. - Niños han muerto atropellados
ALMACENAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> -En casa 	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando se almacena en barriles o pilas "agarra lama" - Cuando se almacena en cántaros y pilas es muy poca el agua -Hay que Ir a bañarse a la quebrada o al pozo

2.3 Sistemas mejorados de abastecimiento de agua

Llamaremos sistemas mejorados a todos aquellos sistemas que incorporan nuevos elementos a los sistemas tradicionales para mejorar el funcionamiento del mismo. Estos nuevos elementos tienen como objetivo reducir las problemáticas tradicionales mediante el empleo de nuevos medios, con mayor o menor nivel tecnológico, que permitan mejorar la calidad y seguridad del abastecimiento, reducir el esfuerzo necesario y producir un impacto positivo en la calidad de vida de los usuarios del sistema.

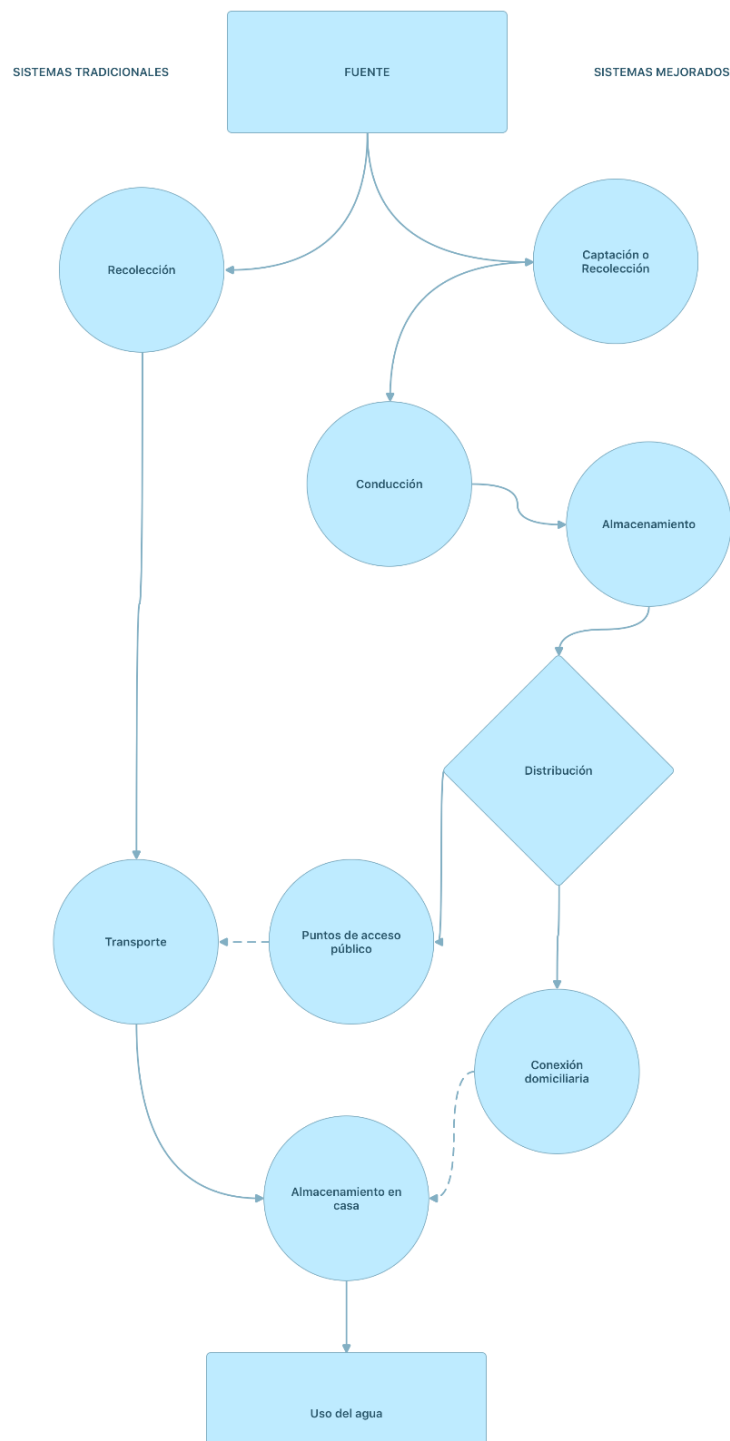


Figura 11 Esquema de un sistema de abastecimiento de agua mejorado. Fuente: Autor

Los sistemas mejorados, frente a los tradicionales, incorporan nuevos elementos de distinta índole. Las configuraciones son múltiples y dependen de las necesidades de la comunidad y los recursos de que dispone (hidrológicos, económicos, sociales...). A continuación, se describen los elementos de mejora de un sistema:

2.3.1 Captación

Gran mayoría de estos sistemas implementan una mejora en la recolección del recurso hídrico. Para estos se realizan captaciones de distinta manera

-Captación natural:

Se aprovecha la orografía para reconducir el agua de sus corrientes naturales hacia una conducción. Es muy común en el caso de contar con quebradas, ríos, ojos de agua y otros tipos de fuentes de agua superficiales.



Captación natural en la comunidad de “Camalote”, Honduras. Fuente: Autor

De igual manera también se realizan este tipo de captaciones para el agua de lluvia. El agua de lluvia suele ser utilizada para tareas domésticas e higiene personal, evitando el consumo de la misma siempre que sea posible. Esto permite aliviar la carga de consumo del sistema al aprovechar agua de una fuente tan renovable e independiente como la lluvia.



Captación de agua de lluvia para limpieza en la comunidad de “El Lagartillo”, Achuapa (León) Fuente: Autor

Pozo excavado a mano

En la mayoría de sistemas tradicionales que explotan aguas subterráneas se pueden encontrar este tipo de pozos. Se caracterizan por contar con poca profundidad y gran diámetro.



Pozo manual en construcción y pozo manual en la comunidad de “El Lagartillo”, Achuapa (León) Fuente: Autor

Pozo perforado o sondeo

Este tipo de pozos se caracteriza por una gran profundidad y un diámetro reducido. Requiere una gran infraestructura de perforación y suponen un mayor coste, pero las ventajas que supone son de gran importancia.

Este tipo de pozos generalmente son explotados mediante equipos de bombeo sumergibles y son los más habituales en sistemas mejorados. La bomba puede ser de varios tipos en función al tipo de energía empleado para su funcionamiento. Más adelante se explicará de forma detallada.

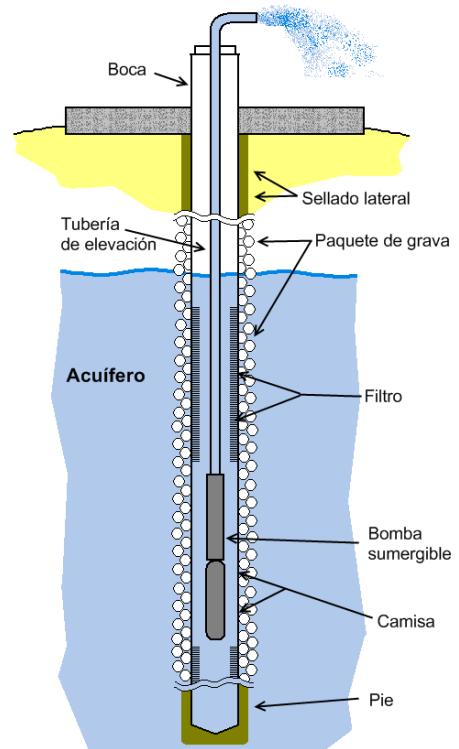


Figura 12 Pozo perforado y sus partes. [30]

2.3.2 Sistema de bombeo

El sistema de bombeo es el componente más crítico de un sistema de abastecimiento de agua, ya que es el encargado de la extracción de este recurso para su posterior aprovechamiento. El sistema de bombeo relaciona directamente la energía empleada y el volumen de agua extraído.

La principal clasificación de las bombas según el funcionamiento en que se base:

-Bombas volumétricas o de desplazamiento positivo: El principio de funcionamiento está basado en la hidrostática, de modo que el aumento de presión se realiza por el empuje de las paredes de las cámaras que varían su volumen. Existen dos tipos: Bombas de émbolo alternativo y bombas volumétricas rotativas o rotoestáticas.

-Bombas rotodinámicas: El principio de funcionamiento está basado en el intercambio de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, aplicando la hidrodinámica. En este tipo de bombas hay uno o varios rodets con álabes que giran generando un campo de presiones en el fluido. El flujo del fluido es continuo. Pueden subdividirse en: radiales o centrífugas, axiales y diagonales o helicentrífugas.

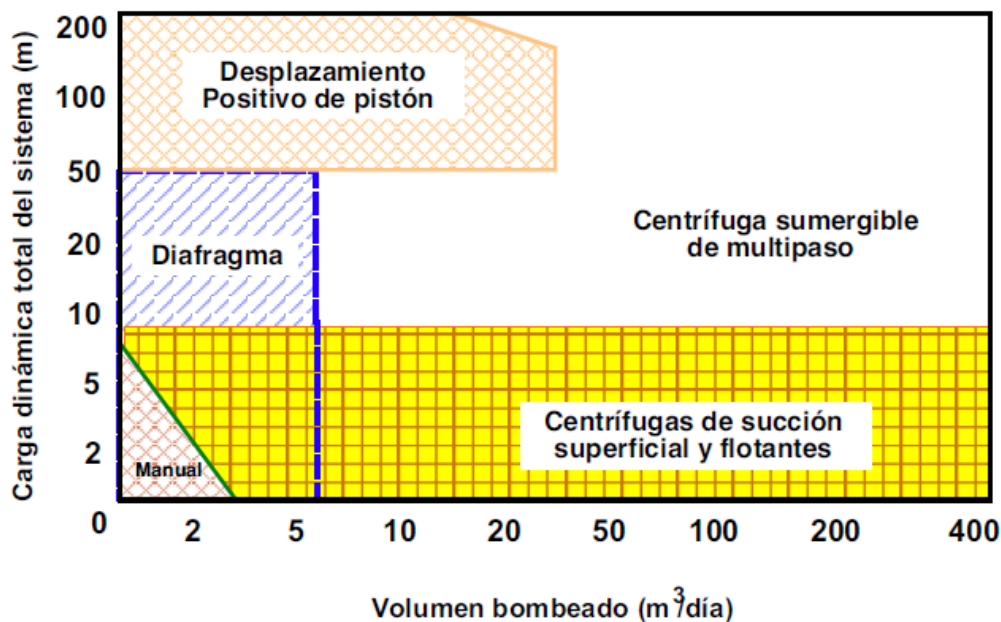
Otra clasificación es posible según la posición que ocupe la bomba respecto al fluido:

-Bombas superficiales: Este tipo de bombas se instalan fuera del agua, en un lugar seco y protegido. Son las más indicadas para bombeos de aguas superficiales tales como estanques, manantiales o pozos de pequeña profundidad

-Bombas sumergibles: Estas bombas trabajan sumergidas en el fluido, generalmente a varios metros de profundidad. Son las más utilizadas para bombeo tanto de pozos perforados como excavados a mano y producen grandes caudales y alturas de bombeo.

En el siguiente gráfico podemos observar la aplicación de diferentes tipos de bombas en sistemas de bombeo fotovoltaico:

Tabla 4 Condiciones de funcionamiento de diferentes tipos de bombas. [34]



Podemos hacer una distinción de los sistemas de bombeo en función del tipo de energía empleada para su funcionamiento.

Sistemas mecánicos de bombeo:

El número de diferentes sistemas de bombeo mecánicos es enorme, mas no es de extrañar si tenemos en cuenta que ha sido el empleado durante la mayor parte de la historia de la humanidad. En 1970 el Banco Mundial desarrolló el programa mundial de prueba de bombas manuales para la extracción de agua (World Hand Pump Testing Program).

Desde los años 70, en Nicaragua se instalaron diversos tipos de bombas manuales tales como la Indian Mark y Afridev. Para no extender este documento innecesariamente se procederá a la descripción de los sistemas de bombeo mecánicos más comunes en las comunidades rurales de Nicaragua.

Bomba de mecate

La bomba de mecate es uno de los mejores ejemplos de “tecnología apropiada” que podemos encontrar. Fue introducida en Nicaragua en 1983 en el área de Santa Cruz (Estelí) basado en un diseño de DEMOTECH, Holanda. Actualmente cuenta con plena aceptación social y es la bomba estándar nacional para proyectos de agua y saneamiento en el medio rural disperso.

Es de tecnología apropiada y de fácil operación y mantenimiento. Tiene una alta eficiencia tanto en pozos poco profundos como en pozos profundos. Su instalación es válida tanto en pozos excavados a mano como en pozos perforados. Se fabrica de forma local y todos los materiales utilizados en su construcción y mantenimiento están localmente disponibles con un costo relativamente bajo (37 USD aproximadamente el modelo con soportes de madera, autoconstrucción).

Según evaluaciones de IRC y otras fuentes, el 90% de estas bombas siguen funcionando tras años de operación. Según una investigación realizada por CESADE las familias que disponen de una bomba de mecate tiene una media de 200 USD adicionales de ingreso anual. [16]



Bomba de mecate en la comunidad de “El Limón” (Estelí) Fuente: Autor

Se trata de una bomba volumétrica de desplazamiento positivo que basa su funcionamiento en la captura y confinamiento de una sucesión de pequeños volúmenes de agua que, de manera similar a una noria, eleva hasta el brocal del pozo. Puede bombear agua hasta 70 m. de profundidad.

Para conseguir este objetivo se dispone una cuerda que arrastra un tren de pistones separados 1 metro, a los que atraviesa por un orificio central. Cuando se hace pasar la cuerda con los pistones por el interior de un tubo de plástico, de diámetro algo mayor que los pistones, con suficiente holgura para su deslizamiento, el agua, que ha sido atrapada en el tramo sumergido del tubo vertical, se eleva con la cuerda ya que los pistones impiden su retroceso por el tubo.

A la altura requerida se dispone una salida lateral del tubo por la que el agua es conducida por gravedad hasta el depósito elevado. La cuerda continúa su camino e invierte su dirección ascendente rodeando una rueda superior, tras la que se dirige hacia la rueda tractora inferior situada cerca del nivel del suelo, que tira de la cuerda al forzar manualmente su giro, y de ahí desciende de nuevo al pozo en un circuito cerrado.

Como se ha indicado, el movimiento de la cuerda, que está convenientemente tensada, es ejercido por la rueda tractora inferior, accionada a su vez manualmente por una manivela coaxial con el eje de la rueda, mediante un movimiento circular continuo. De este modo la energía exterior a ejercer por el operador de la bomba es la necesaria para hacer girar la rueda tractora inferior con un par de giro suficiente para vencer la resistencia que ofrece la cuerda con los pistones en todo el recorrido.

La mayoría de los usuarios de las bombas de mecate son personas de recursos limitados y han tenido acceso a la tecnología mediante el apoyo de proyectos y programas financiados por instituciones de gobierno y organizaciones no gubernamentales. (ENACAL, FISE, UNICEFF, CARE, COSUDE, SNV, OPS). En 1990 se organizó un proyecto en el programa de Ingeniería Ambiental de la UNI con financiamiento del Gobierno de Holanda y de UNICEFF y el apoyo de OPS. En el mismo año se funda la empresa Bombas de Mecate, S.A. (BOMESA).

En Nicaragua existen 3 talleres semi industriales de bombas de mecate que cuentan con recursos humanos, técnicos y financieros sostenibles y al menos 7 talleres artesanales con menores capacidades. [16]

Durante los últimos años, la bomba de mecate, desarrollada en Centroamérica, ha saltado el Océano Atlántico y ha sido introducida con éxito en numerosos países de África. Por su potencial de mejorar el abastecimiento en zonas rurales y generar ingresos La bomba de Mecate ganó un 1er premio en el Foro Mundial del Agua. (World Water Contest en Kyoto, marzo 2003) [17]

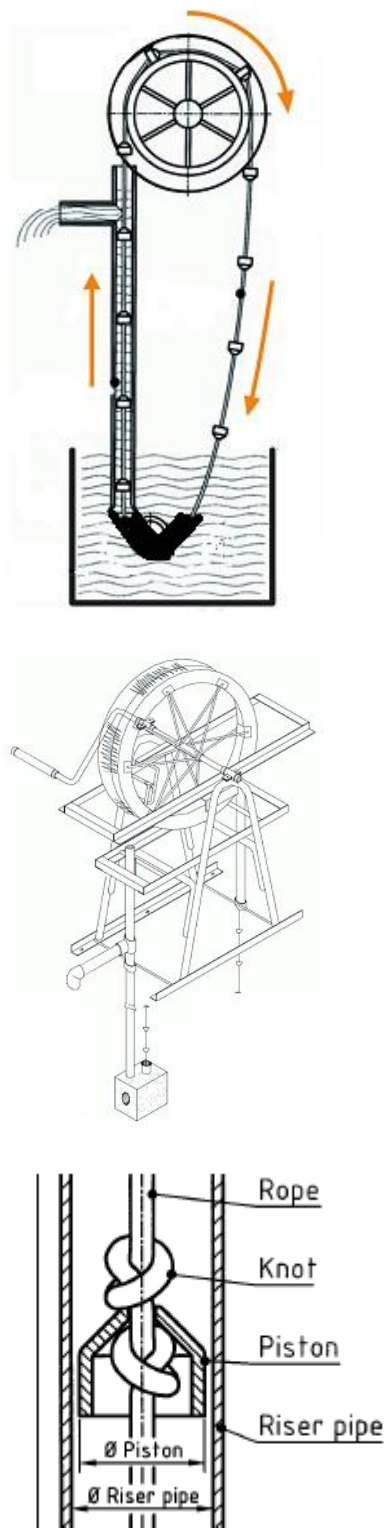


Figura 13 Bomba de mecate

Bicibombas y tracción animal

Una bomba de mecate puede ser modificada de diferentes maneras para aliviar la carga de trabajo que supone a los usuarios suministrar la energía mecánica necesaria para la extracción del agua. Simplemente añadiendo un mecanismo que permita transmitir un movimiento de rotación al eje de la bomba de mecate se pueden desarrollar diversas soluciones.

La más común es la adaptación de una bicicleta para transformar el trabajo producido por el pedaleo en energía para la bomba. Para el usuario es mucho más ergonómico y práctico realizar el trabajo físico de esta manera y, teniendo en cuenta que trabajan grupos musculares mayores y se ejerce un menor esfuerzo cardiorespiratorio, se puede obtener un mayor rendimiento del sistema.



Ejemplo de bicibomba. [18]

Otra solución es el uso de tracción animal mediante animales de tiro. Esto permite aumentar de forma considerable la potencia entregada a la bomba y libera al usuario de la realización de un trabajo físico, no obstante no está exento de complicaciones dada la naturaleza de la fuente de energía. Por lo general los sistemas de tracción animal se emplean para bombear grandes cantidades de agua destinadas a regadío.



Ejemplo de adaptación de bomba de mecate con tracción animal. [18]

Bomba EMAS

Se trata de una bomba de desplazamiento positivo, producido mediante un pistón de accionamiento manual. Funciona comprimiendo agua entre dos válvulas de retención (que sólo dejan pasar el agua hacia arriba): la válvula de pie y la de pistón.

Su nombre procede del fabricante boliviano encargado de su construcción: la Escuela Móvil de Agua y Saneamiento. Esta bomba, también muy eficaz y ampliamente extendida en América Latina (20.000 unidades en Bolivia, 10.000 en Brasil, etc.) es una de las más baratas. Puede extraer el agua situada hasta 20 m de profundidad y elevarla a la misma distancia a un caudal del orden de los $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ (en función del esfuerzo físico empleado). Puede abastecer a unas 40 personas.

La tecnología EMAS representa una solución sencilla y barata, a la vez que robusta y efectiva, para agua y saneamiento rural. La idea es proveer diseños que únicamente requieran herramientas relativamente sencillas y materiales que se encuentran de forma local en cualquier ferretería (tubos PVC estándar, adaptadores de rosca, tubo de hierro galvanizado).

Contrario a la mayoría de las demás bombas de pistón, el agua sale al bajar el pistón. Por esta razón, a la bomba EMAS normalmente no se le instala una palanca: se acciona directamente.

Las bombas EMAS han sido aplicadas con gran éxito en muchos proyectos de abastecimiento de agua. Existen múltiples manuales de construcción disponibles en internet y, al igual que la bomba de mecate, se han realizado diversas adaptaciones de la misma.

Sus mayores ventajas son la facilidad de su construcción y el empleo de materiales locales, la sencillez de instalación y la movilidad del sistema. En contrapartida estas bombas presentan algunos problemas tales como una baja vida útil, una capacidad de bombeo limitada, alta demanda de esfuerzo físico para pozos de más de 10m. y un bajo caudal.

Los problemas derivados de su mantenimiento y su vida útil, así como el esfuerzo físico necesario para su operación ha hecho que, en la mayoría de comunidades rurales de Nicaragua, haya sido sustituida por la bomba de mecate. No obstante, sigue siendo una solución apropiada para muchos de los problemas de abastecimiento de agua a nivel mundial.

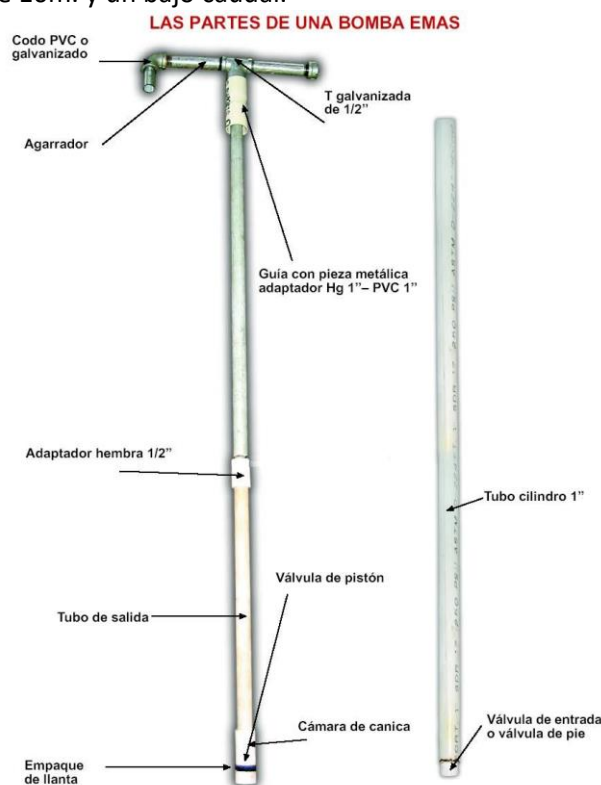


Figura 14 Bomba EMAS

[19]

[20]

Aerobombas

Este tipo de bombas mecánicas se caracterizan por transformar energía eólica en mecánica para su uso en la extracción de agua. En Nicaragua se desarrolló un sistema eólico para bombeo de agua de bajo costo que empezó a funcionar en 1989, a partir de un proyecto que promovió la energía eólica en el país.

En los modelos clásicos de aerobombas se emplea un sistema de engranajes y una bomba de pistón. Esto hace que el costo de fabricación sea elevado, limitando por tanto el acceso a la tecnología. Con el fin de disminuir costes económicos se diseñó un sistema sencillo que usaba materiales locales basado en la bomba de rotación de mecate.

La Aerobomba de mecate combina la bomba de mecate con un nuevo molino de viento, en parte basado en una moderna aerobomba holandesa (CWD 2000). No tiene caja de engranajes, lo que permite conectar el movimiento del rotor directamente al eje de la bomba y transmitir la energía necesaria para el bombeo

La empresa AMEC (Aerobombas de Mecate), afincada en Managua, produce estas aerobombas de mecate. Tiene un precio que oscila entre 400 y 600 USD y su producción se destina en su mayoría a finqueros de las zonas productivas del país. Actualmente existen 220 aerobombas instaladas, especialmente en sistemas destinados a regadío.

Hay 2 modelos de aerobombas de mecate.

Modelo 270 - Funciona sólo con vientos que cambian de dirección dentro de 270 grados (vientos estacionales).

Modelo 360 - Funciona para todas las direcciones del viento (en periodo de pruebas).



Aerobomba de mecate

Motobombas

Se denomina motobomba al conjunto de elementos que integran un sistema de bombeo cuya energía procede de un motor de combustión. Este tipo de bombas tienen unas excelentes condiciones de funcionamiento, pero dependen del suministro de combustible para su funcionamiento, lo cual hace que su utilización en sistemas de abastecimiento se vea reducida. Además, el gasto económico que conlleva su funcionamiento es elevado y no suele presentarse como una alternativa viable en sistemas de abastecimiento de agua en comunidades rurales. Su presencia se encuentra limitada a sistemas de abastecimiento puntuales y dispersos.

Una configuración común es un equipo Diesel de generación conectado a una bomba eléctrica. Cuando se dispone de un generador y de una fuente de energía alternativa es común utilizar el equipo de generación como sistema de respaldo. Es común encontrar esta solución en SBFVs que necesitan ampliar su capacidad.

También existen ejemplos de adecuación de bombas manuales que aprovechan la energía generada por motores de combustión. A continuación, podemos observar un ejemplo de bomba de mecate adaptada:



Sistemas electrohidráulicos de bombeo

Una bomba electrohidráulica transforma la energía eléctrica en energía mecánica con la que es accionada el fluido incompresible que mueve. Al incrementar la energía del fluido, se aumenta su presión, su velocidad o su altura, todas ellas relacionadas según el principio de Bernoulli. En general, una bomba se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión a otra de mayor presión.

En todos los casos de estudio de este proyecto nos encontramos con electrobombas centrífugas sumergibles y, por lo tanto, se procederá a hacer una descripción más detallada de su funcionamiento y condiciones de trabajo más adelante.

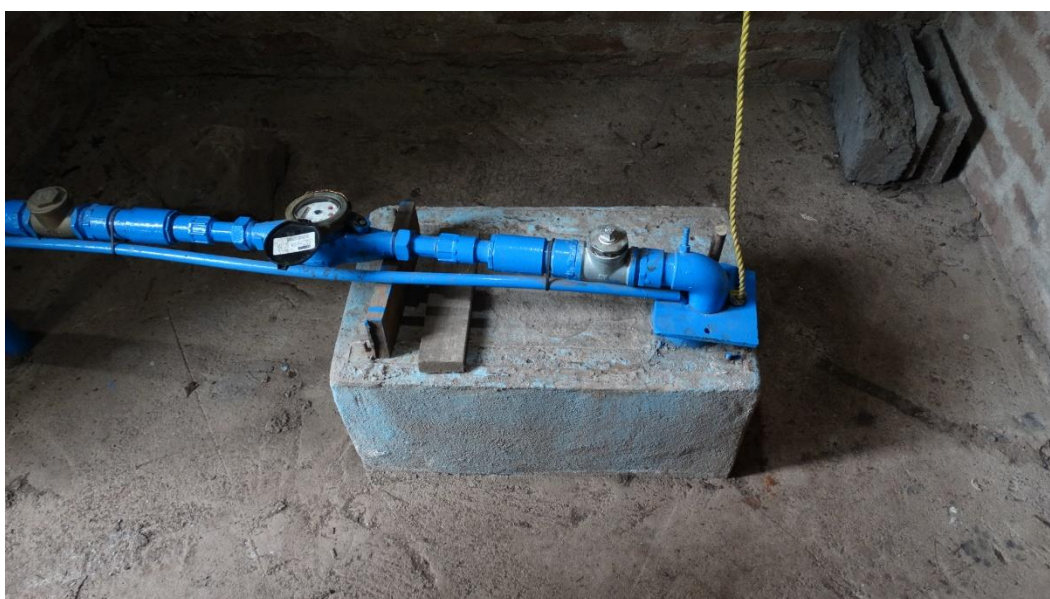
2.3.3 Conducción

Otro elemento clave en un sistema de abastecimiento de agua es la línea de conducción. Consta de un conjunto de tuberías, codos, empalmes, válvulas de control, etc. La línea de conducción comienza en la fuente de abastecimiento de agua y se encarga de conducir esta hasta un sistema de almacenamiento.

El sistema de bombeo conduce el agua por la línea de conducción a través de la cabeza del pozo. Suele contar con un caudalímetro (o dos en paralelo) situado a la salida de pozo para poder tener un control del volumen extraído del pozo y el caudal de extracción. Generalmente la línea de conducción se encuentra enterrada a una cierta profundidad y no es accesible salvo en su conexión al pozo y al sistema de almacenamiento.



Inicio de la línea de conducción en un pozo excavado a mano en la comunidad de “El Lagartillo”, Achuapa (León)
Fuente: Autor



Inicio de la línea de conducción en un pozo perforado en la comunidad de “El Limón” (Estelí) Fuente: Autor

2.3.4 Almacenamiento

El almacenamiento de agua tiene una importancia crucial en un sistema de abastecimiento de agua. El agua extraída de la fuente se almacena en grandes volúmenes para su posterior distribución. Los sistemas más comunes de almacenamiento son pilas de cemento de gran tamaño o depósitos de plástico de menor tamaño. Es posible encontrar una combinación de ambos en algunas comunidades, empleándose los depósitos de plástico como sistemas de almacenamiento secundario o incluso privado.

Los sistemas de almacenamiento suelen disponer de sistemas de cloración para el tratamiento del agua almacenada. Estos consisten en hacer circular parte del caudal de entrada a través de un circuito paralelo donde se encuentra cloro en forma de pastillas. Parte de este cloro es arrastrado al interior del tanque y se mezcla con el agua almacenada. Se puede controlar el nivel de cloración en función del flujo que circula por el circuito clorador.



Sistema de cloración en la comunidad de “El Limón” (Estelí) Fuente: Autor

Cabe destacar que las pilas de almacenamiento precisan de un atento mantenimiento, siendo primordial su limpieza periódica para garantizar las condiciones higiénicas y de salud de los consumidores. Disponen de una vida útil larga pero limitada.



Sistema de almacenamiento de la comunidad de “El Lagartillo”, Achuapa (León) Fuente: Autor

De der. A izq. Podemos observar la pila principal, el tanque secundario y la antigua pila en desuso

2.3.5 Distribución

La distribución de agua se realiza normalmente por gravedad. Los sistemas de almacenamiento se suelen colocar en altura, ya sea aprovechando el relieve natural del terreno o construyendo una estructura. Esto permite que, al almacenar agua en altura, estamos acumulando energía potencial para el empleo en su posterior distribución. En algunos casos puede ser necesario en empleo de estaciones de bombeo secundarias. En función de las necesidades y recursos de la comunidad podemos encontrarnos con dos tipos distintos de distribución:

Distribución con puntos de acceso públicos:

El agua de consumo es accesible a través de puestos públicos en la comunidad, no llega hasta los domicilios particulares.



Punto de consumo público en la comunidad de "El Lagartillo", Achuapa (León) Fuente: Autor

Distribución con conexión domiciliaria:

El agua es distribuida a los domicilios particulares de los miembros de la comunidad a través de la red de distribución. Cuando existe este tipo de distribución resulta muy apropiada la instalación de sistemas de micro medición para registrar el consumo individual de los miembros de la comunidad y elaborar una tarifa justa y proporcional por el servicio de abastecimiento de agua.



Punto de conexión domiciliaria en la comunidad de "El Limón" (Estelí) Fuente: Autor

2.3.6 Almacenamiento doméstico

Todos los usuarios de sistemas de abastecimiento de agua cuentan con algún tipo de almacenamiento doméstico, pues facilita el acceso al agua y aumenta su disponibilidad (especialmente en sistemas que no funcionan de forma continua).

Normalmente se almacena el agua en todo tipo de recipientes, botellas, bidones, garrafas, etc. Estos elementos suelen ser plásticos o cerámicos y no poseen de ningún tipo de tratamiento del agua de consumo. Las enfermedades relacionadas con el consumo de agua inadecuada son un gran problema, especialmente en el ámbito rural.

Muchas veces no se dispone de sistemas de tratamiento de agua en el sistema de abastecimiento o estos resultan ineficientes. Es por esto que se han desarrollado sistemas de almacenamiento doméstico de agua con equipos de filtrado y tratamiento de agua. En la mayoría de los casos estos elementos cuentan con un sistema de filtrado que retiene las partículas en suspensión en el líquido. Otros más avanzados también cuentan con sistemas de purificación.

En Nicaragua existe un ejemplo de estos sistemas, conocido como FILTRON. El FILTRON es un filtro de cerámica que elimina las bacterias y la turbidez del agua desarrollado y producido de forma local en Nicaragua. [22]

Purifica el agua de dos formas; es un retenedor de sólidos ya que los poros de la unidad filtrante son tan pequeños que no deja pasar elementos más grandes como (bacterias y partículas de polvo, basura), por otro lado, la unidad filtrante está impregnada con plata coloidal uno de los biocidas naturales más eficaces.

Esta tecnología que busca purificar agua de una manera económica, ecológica, eficaz y de fácil comprensión fue premiada por el Banco Mundial en 2003 y 2004 con el premio *Market Place Award*. La Organización Mundial de la Salud reconoce este método de filtración como uno de los más eficaces para tratar el agua contaminada con patógenos dañinos para la salud.



Almacenamiento doméstico en la comunidad de “El Lagartillo”, Achuapa (León)

Fuente: Autor



2.4 Sistemas de generación fotovoltaicos

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía renovable cuyo principio reside en la aplicación del efecto fotoeléctrico para la generación de energía eléctrica. Se emplean dispositivos semiconductores, comúnmente denominados células fotovoltaicas, para transformar la energía de los fotones incidentes y crear un flujo de electrones libres. El resultado es una corriente eléctrica continua (DC).

2.4.1 Principio de funcionamiento

“En un semiconductor expuesto a la luz, un fotón incidente arranca un electrón, creando a la vez un «hueco» en el átomo excitado. El principio de una célula fotovoltaica es obligar a los electrones y a los «huecos» a avanzar hacia el lado opuesto del material en lugar de simplemente recombinarse en él. Así se produce una diferencia de potencial y por lo tanto tensión entre las dos partes del material.

Para ello, se crea un campo eléctrico permanente entre dos capas dopadas respectivamente, p y n. En las células de silicio se encuentran, por tanto:”

- “La capa superior de la celda, que se compone de silicio dopado de **tipo n**.

En esta capa, hay un número de electrones libres mayor que en una capa de silicio puro. El material permanece eléctricamente neutro, ya que tanto los átomos de silicio como los del material dopante son neutros. La red cristalina tiene globalmente una mayor presencia de electrones que en una red de silicio puro.”

- “La capa inferior de la celda, que se compone de silicio dopado de **tipo p**.

Esta capa tiene una cantidad media de electrones libres menor que una capa de silicio puro. Los electrones están ligados a la red cristalina que, en consecuencia, es eléctricamente neutra. Esta red presenta huecos positivos (p). La conducción eléctrica está asegurada por estos portadores de carga, que se desplazan por todo el material.”

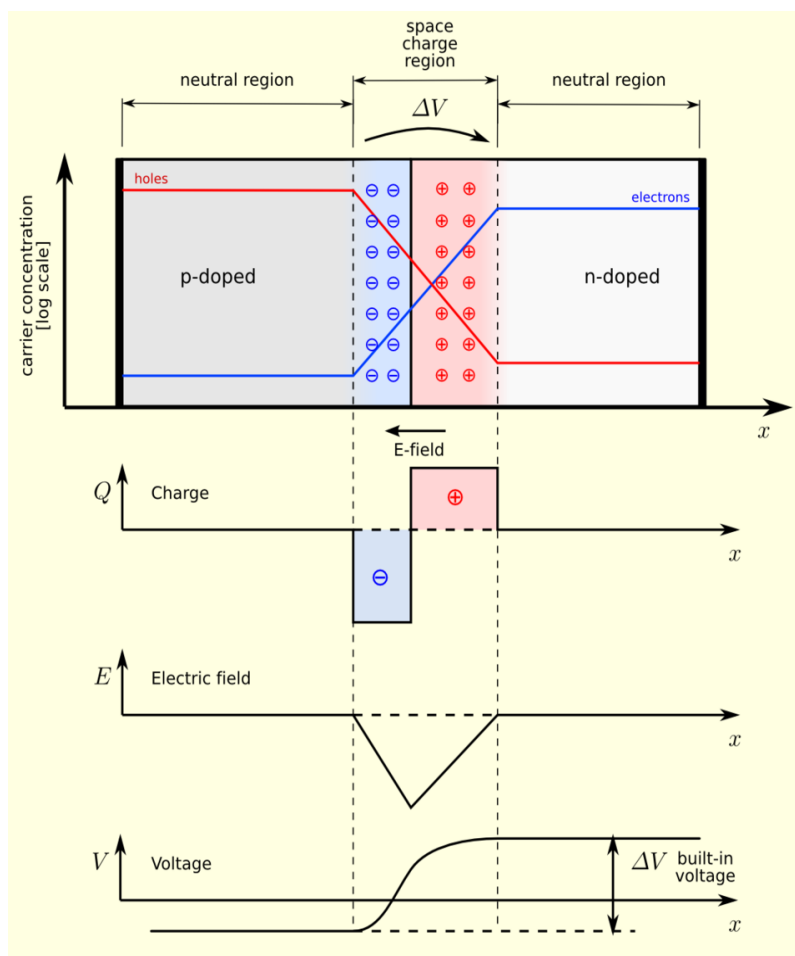


Figura 15 Efecto fotovoltaico en células de silicio dopado

*“En el momento de la creación de la unión **pn**, los electrones libres de la capa **n** entran instantáneamente en la capa **p** y se recombinan con los huecos en la región **p**. Existirá así durante toda la vida de la unión, una carga positiva en la región **n** a lo largo de la unión (porque faltan electrones) y una carga negativa en la región **p** a lo largo de la unión (porque los huecos han desaparecido); el conjunto forma la «Zona de Carga de Espacio» (ZCE) o "zona de barrera" y existe un campo eléctrico entre las dos, de **n** hacia **p**.*

*Este campo eléctrico hace de la ZCE un diodo, que solo permite el flujo de portadores en una dirección: En ausencia de una fuente de corriente exterior y bajo la sola influencia del campo generado en la ZCE los electrones solo pueden moverse de la región **p** a la **n**, pero no en la dirección opuesta y por el contrario los huecos no pasan más que de **n** hacia **p**.*

*En funcionamiento, cuando un fotón arranca un electrón a la matriz, creando un electrón libre y un hueco, bajo el efecto de este campo eléctrico cada uno va en dirección opuesta: los electrones se acumulan en la región **n** (para convertirse en polo negativo), mientras que los huecos se acumulan en la región dopada **p** (que se convierte en el polo positivo).*

En resumen, una célula fotovoltaica es el equivalente de un generador de energía a la que se ha añadido un diodo. Para lograr una célula solar práctica, además es preciso añadir contactos eléctricos (que permitan extraer la energía generada), una capa que proteja la célula pero deje pasar la luz, una capa anti reflectante para garantizar la correcta absorción de los fotones, y otros elementos que aumenten la eficiencia del misma.” [23]

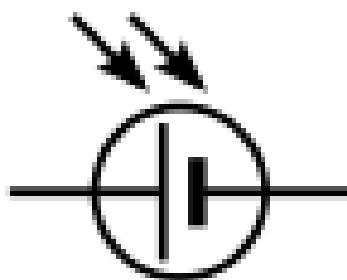


Figura 16 Símbolo empleado para designar células fotovoltaicas

Este tipo de energía se usa principalmente para producir electricidad a gran escala a través de redes de distribución, aunque también permite alimentar innumerables aplicaciones en aparatos autónomos y sistemas aislados de la red eléctrica. Debido a la creciente demanda de energías renovables, la fabricación de células solares e instalaciones fotovoltaicas ha avanzado considerablemente en los últimos años. A principios de 2017, se estima que hay instalados en todo el mundo cerca de 300 GW de potencia fotovoltaica.

La energía fotovoltaica no emite ningún tipo de polución durante su funcionamiento, contribuyendo a evitar la emisión de gases de efecto invernadero. Su principal desventaja consiste en que su producción depende de la radiación solar, por lo que si la célula no se encuentra alineada perpendicularmente al Sol se pierde entre un 10-25 % de la energía incidente. La producción se ve afectada asimismo por las condiciones meteorológicas adversas, como la falta de sol, nubes o la suciedad que se deposita sobre los paneles.

Gracias a los avances tecnológicos, la sofisticación y la economía de escala, el coste de la energía solar fotovoltaica se ha reducido de forma constante desde que se fabricaron las primeras células solares comerciales, aumentando a su vez la eficiencia, y logrando que su coste medio de generación eléctrica sea ya competitivo con las fuentes de energía convencionales en un creciente número de regiones geográficas, alcanzando la paridad de red.

Actualmente el coste de la electricidad producida en instalaciones solares se sitúa entre 0,05-0,10 USD/kWh en Europa, China, India, Sudáfrica y Estados Unidos. En 2015, se alcanzaron nuevos récords en proyectos de Emiratos Árabes Unidos (0,0584 USD/kWh), Perú (0,048 USD/kWh) y México (0,048 USD/kWh). En mayo de 2016, una subasta solar en Dubái alcanzó un precio de 0,03 \$/kWh. [24]

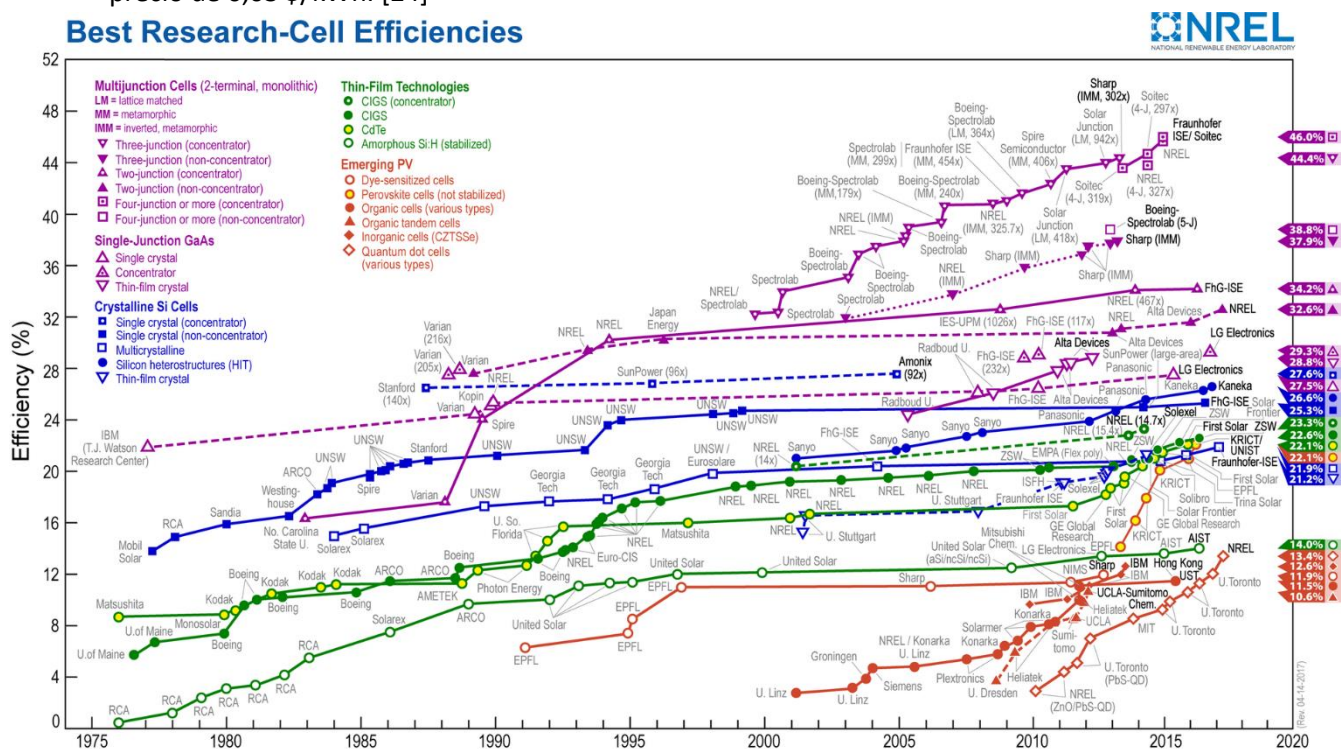


Figura 17 Cronología de las eficiencias de conversión en células solares fotovoltaicas. [37]

Actualmente el uso de esta tecnología en proyectos de cooperación es una solución que ha sido empleada con éxito en innumerables casos y la reducción de su coste ha permitido convertirla en una alternativa asequible y apropiada.

2.4.2 Tipos de Células Solares

Las celdas solares de silicio se pueden fabricar de diferentes formas, por supuesto con diversas tecnologías, para lograr determinados objetivos de rendimiento, además diferentes condiciones físicas, tales como la flexibilidad, el espesor y diferencias de precio. Por lo que la elección para la fabricación depende de los objetivos que se desean conseguir.

El 87,4% de las células solares comerciales se fabrican con silicio cristalino. El Silicio es el elemento más abundante en la corteza terrestre (más del 60%).

- **Silicio monocristalino:** Están formados por una única estructura cristalina de Silicio estable a lo largo de toda la célula. Fueron los primeros ejemplares que surgieron en las células FV (año 1954) y se obtienen a través del método Czchralsky, mediante silicio puro fundido y dopado con boro. Estas células se caracterizan por tener un color azul homogéneo. Históricamente han sido las células más eficientes (15-18%).
- **Silicio policristalino:** Están formadas por diferentes granos cristalinos de Silicio. Estas células se diferencian de las monocristalinas por las variantes en las tonalidades del azul. Con esta tecnología se logra tener menor espesor (solo algunas micras) en comparación con las monocristalinas, pero el rendimiento es menor por las impurezas en el material. No obstante, en los últimos años han alcanzado rendimientos del 14-16% y su precio en el mercado es menor que el de las monocristalinas.
- **Silicio amorfo:** Se componen de Silicio en estado amorfo, no cristalino. En comparación con las dos anteriores, esta es la que tiene menor rendimiento que es <10%, el costo es menor, se pueden construir células FV flexibles que luego se pueden adherir a vidrios, plásticos o similar. Presentan un color marrón homogéneo.

La potencia proporcionada por una célula fotovoltaica depende del rendimiento de los componentes semiconductores, la radiación solar y el ángulo con el que los rayos solares inciden sobre la misma. En los casos que veremos en este estudio no se emplean sistemas seguidores de la trayectoria solar, se trata de sistemas fijos. Por lo tanto, no se procederá a la descripción de estos.

[23]

2.4.3 Paneles Fotovoltaicos

Al conjunto de células fotovoltaicas interconectadas se le denomina módulo o panel fotovoltaico, aunque más comúnmente se conoce como panel solar. Estos paneles constituyen la unidad mínima de generación de un sistema fotovoltaico.

Un módulo fotovoltaico o panel solar está constituido por varias células iguales conectadas eléctricamente entre sí.

En función de la combinación de conexiones serie/paralelo se pueden regular los valores de voltaje e intensidad suministrados por el panel.

La mayoría de los paneles se construyen primero asociando células en serie hasta alcanzar el nivel de tensión deseado y, posteriormente, conectando en paralelo varias asociaciones de células en serie hasta conseguir el nivel de intensidad deseado.

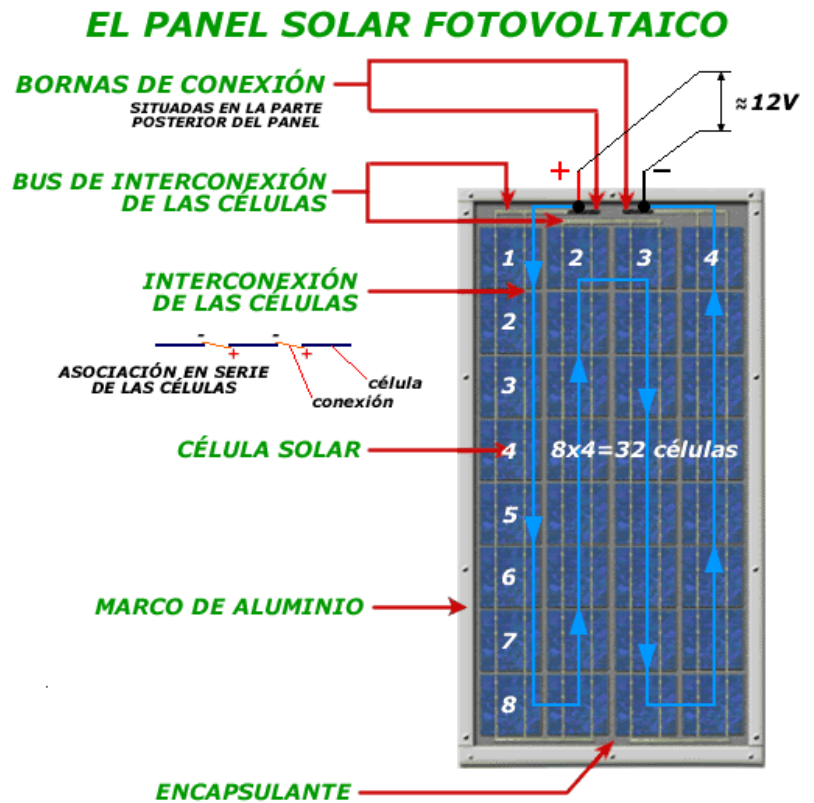


Figura 18 Módulo FV de 32 células interconectadas en serie [40]

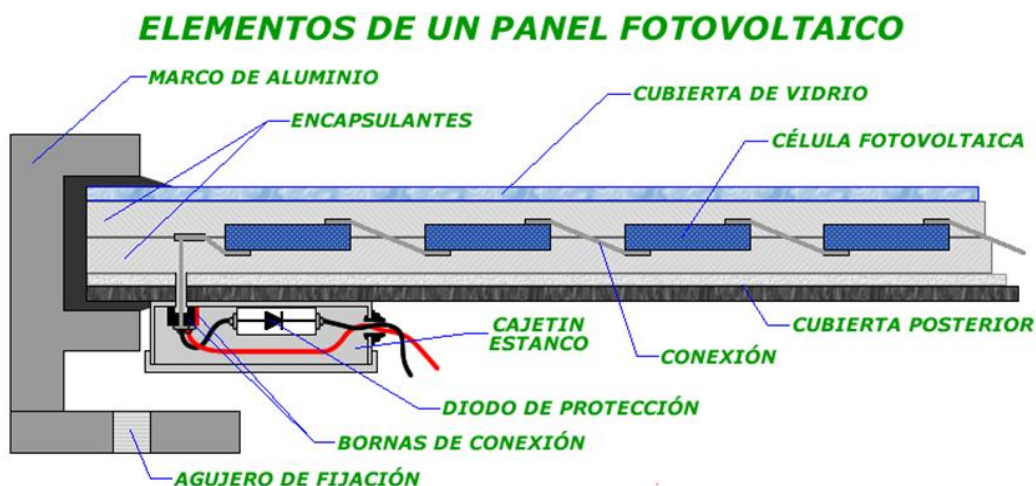


Figura 19 Elementos de un panel fotovoltaico [40]

2.4.4 Parámetros de un panel fotovoltaico

Los siguientes parámetros son los que definen las condiciones de funcionamiento de un panel fotovoltaico y su entendimiento es clave para el posterior estudio de sistemas de bombeo fotovoltaico:

- Radiación (G): energía incidente por unidad de superficie. Se mide en Wh/m^2 .
- Irradiancia (λ): potencia incidente por unidad de superficie. Se mide en W/m^2 .
- Temperatura de la célula (T_{cel}): temperatura de la célula en servicio.
- Corriente de cortocircuito (I_{sc}): máxima intensidad generada en el panel cuando no hay conectado ningún consumo y se cortocircuitan sus bornes.
- Tensión de circuito abierto (V_{oc}): máxima tensión que proporciona el panel cuando no hay conectado ningún consumo (los bornes están al aire).
- Punto de máxima potencia (MPP): punto para el cual la potencia entregada es máxima, obteniéndose el mayor rendimiento posible del panel.
 - Corriente máxima (I_{max}): máxima intensidad que entrega el panel trabajando en el punto de máxima potencia.
 - Tensión máxima (V_{max}): máxima tensión que entrega el panel trabajando en el punto de máxima potencia.
- Potencia máxima (P_{max}): Potencia máxima que entrega el panel trabajando en el punto de máxima potencia.
- Tensión máxima del sistema ($V_{max\ sistema}$): máxima tensión para el total del arreglo de paneles fotovoltaicos.
- Coeficientes de temperatura:
 - Coeficiente de potencia (δ): variación de potencia. Se expresa en $\%/K$
 - Coeficiente de tensión (δ_V): variación de tensión. Se expresa en mV/K
 - Coeficiente de corriente (δ_I): variación de corriente. Se expresa en mA/K

2.4.5 Curva característica

La curva característica de los módulos fotovoltaicos es la representación de la relación entre la tensión y la corriente generada. Esta curva se estudia en condiciones estándar de medida (CEM), según la norma europea - EN61215:

- Irradiancia: 1000 W/m^2
- Incidencia normal.
- Distribución espectral de la radiación incidente de Am 1.5
- Temperatura de célula: 25°C

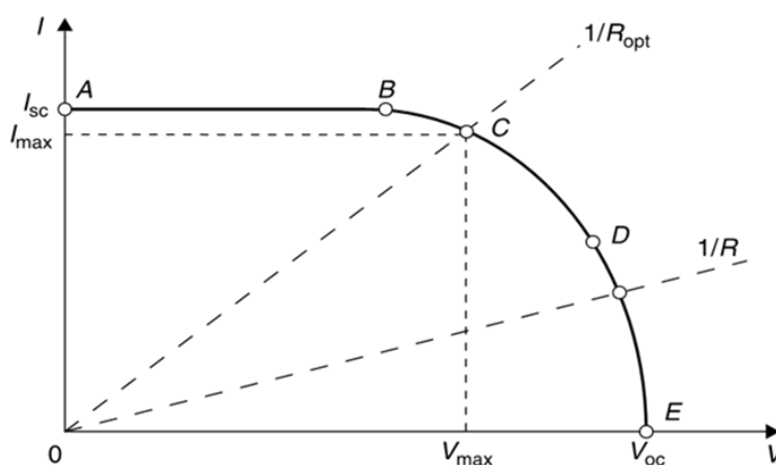


Figura 20 Curva característica fotovoltaica

Los módulos fotovoltaicos ven afectadas sus condiciones de trabajo y, por tanto, deformando la curva característica a las condiciones reales. Esto es debido a dos factores:

2.4.6 Variación de corriente y potencia en función de irradiancia incidente

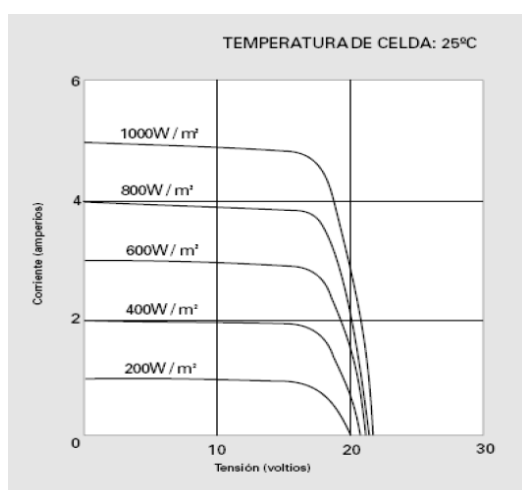


Figura 22 Variación de la corriente

$$I = I_{CEM} \cdot \frac{\lambda}{\lambda_{CEM}}$$

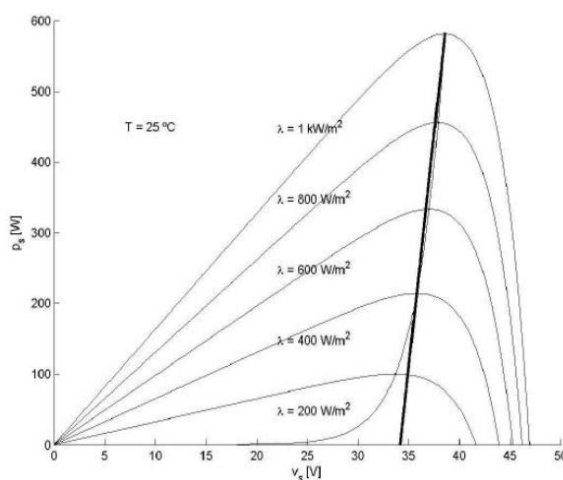


Figura 21 Variación de la potencia

$$P = I \cdot V$$

2.4.7 Variación de la tensión en función de la temperatura

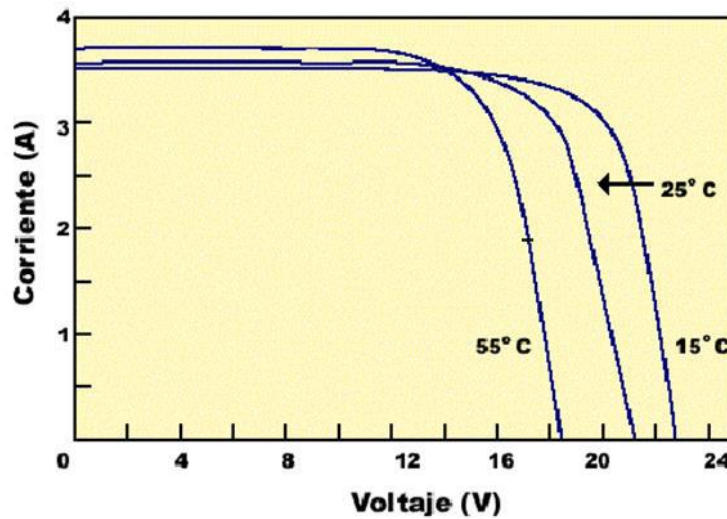


Figura 23 Variación de la tensión en función de la temperatura (irradiancia CEM)

$$V = V_{CEM} - 0,0023 \cdot (T_a - 25)$$

- V = tensión de salida del módulo (V)
- V_{CEM} = tensión de salida del módulo en Condiciones Estandar de Medida (V)
- T_a = temperatura del módulo ($^{\circ}\text{C}$)

De forma general el rendimiento del generador se puede corregir mediante el factor:

$$\eta_{fv} = 1 - \delta \cdot (T_m - 25) \cdot \eta_{CEM}$$

- η_{fv} = rendimiento del módulo
- δ = coeficiente de variación potencia/temperatura ($1/^{\circ}\text{C}$)
- T_m = temperatura media diaria del módulo ($^{\circ}\text{C}$)
- η_{CEM} = rendimiento del módulo en Condiciones Estandar de Medida

El coeficiente de variación de la potencia con la temperatura " δ " de las células varía entre 0,004 y 0,005 ($1/^{\circ}\text{C}$) para Si monocristalino.

2.4.8 Orientación de un módulo fotovoltaico

En este tipo de sistemas no suelen emplearse sistemas seguidores, por lo que nos encontramos ante estructuras fijas con dos ángulos definidos de orientación: α y β

- α = ángulo de azimut. Es el ángulo entre la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del módulo y el meridiano del lugar.
- β = ángulo de inclinación. Es el ángulo que forma la superficie de los módulos con el plano horizontal.

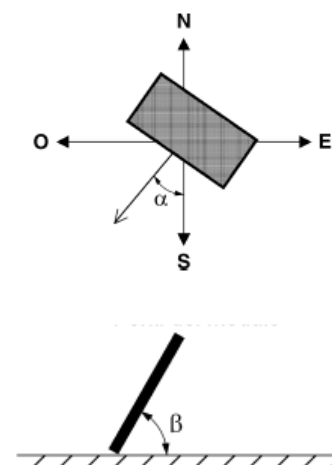


Figura 24 Ángulos azimut e inclinación

2.4.9 Efectos de degradación en células fotovoltaicas

En las células fotovoltaicas se producen ciertos fenómenos de degradación durante la vida útil de las mismas. Esta degradación de las células se debe a dos motivos principales: la luz incidente y el voltaje de operación.

LID - Light Induced Degradation (degradación inducida por la luz)

En las células fotovoltaicas ocurre una degradación debido al flujo de electrones a través de las uniones **pn**. Esta degradación se puede dividir en dos categorías:

- Estabilización de potencia (power stabilization): es la degradación inicial que ocurre al exponer a los módulos a la radiación solar. La pérdida de potencia media en el primer año se encuentra en torno al 3% y suele venir especificada en la hoja de características del módulo.
- Degradación de potencia (power degradation): es la degradación ocurrida a partir del primer año de funcionamiento y se sitúa en un valor medio del 0.8%.

En el siguiente gráfico se puede observar el efecto de degradación en un estudio realizado con 58 módulos de diferentes marcas, estudiando su efecto tras una exposición solar de 25 kWh/m² y posterior determinación de máxima potencia en condiciones estándar de medida. Un 57% de los módulos ensayados mostraron una pérdida de potencia mayor a un 3%. [25]

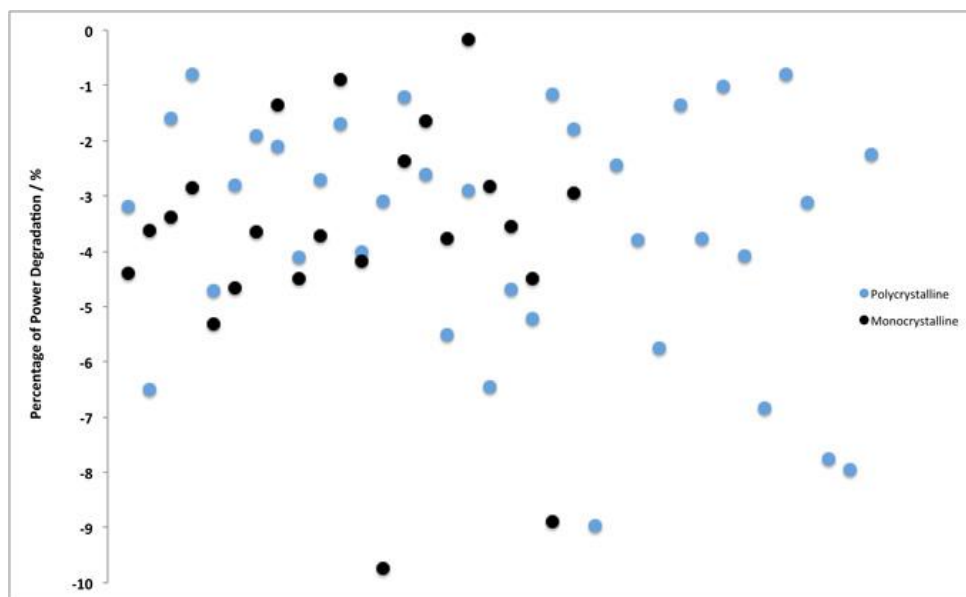


Figura 25 Efecto de LID. [25]

PID - Potential Induced Degradation (degradación inducida por potencial eléctrico)

Este tipo de degradación de potencia suele ocurrir cuando las condiciones de operación superan valores de 1 kV, combinado con condiciones ambientales tales como el calor y la humedad. La acumulación de residuos en el panel puede provocar la aparición de iones de sodio que catalizan este efecto. Los módulos afectados por PID suelen cumplir un patrón de células inactivas cerca del marco del módulo. Dicho patrón está relacionado con el flujo de cargas negativas, debido al exceso de cargas positivas.

2.4.10 Configuración de paneles fotovoltaicos

Al igual que las células fotovoltaicas se interconectan en asociaciones serie y paralelo, con los paneles fotovoltaicos se hace lo mismo. Al conjunto de paneles fotovoltaicos interconectados se le suele denominar arreglo fotovoltaico. Una vez determinados los parámetros de corriente y tensión requeridos al sistema se estudia la configuración más óptima.

Se emplea la siguiente nomenclatura para designar un arreglo de paneles fotovoltaicos en función de su interconexión:

$$n_{serie} S \times n_{paralelo} P$$

- n_{serie} : número de paneles en serie en cada rama.
- $n_{paralelo}$: número de ramas en paralelo.

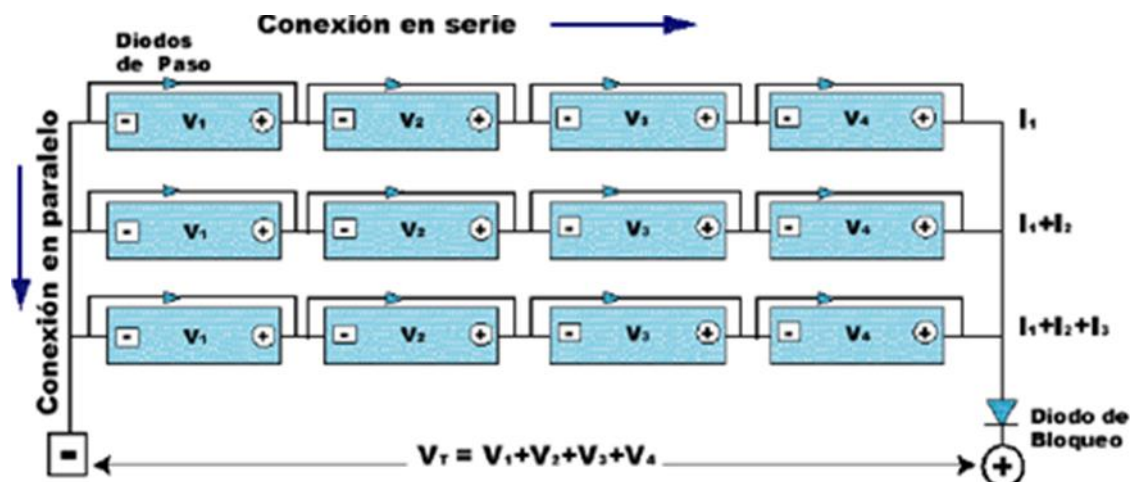


Figura 26 Arreglo 4S X 3P

Generalmente los arreglos de paneles fotovoltaicos están conectados a otros elementos a su salida, tales como inversores o elevadores de tensión. Estos elementos son los encargados de adecuar las condiciones de salida de la corriente eléctrica de los paneles a las condiciones finales de trabajo del sistema. Puede tratarse de una transformación DC/AC, elevar su tensión, etc.

Los sistemas de control más avanzados incluyen un sistema de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) y hacen que los paneles trabajen siempre en las condiciones de máxima potencia para su mayor rendimiento. También pueden incorporar elementos de control de la otra parte del sistema, como la regulación de una bomba, conexión a un sistema de respaldo o sistemas de seguridad y sensores.

2.5 Sistemas de bombeo fotovoltaico (SBFV)

Un sistema de bombeo fotovoltaico es un tipo de sistema de abastecimiento de agua que tiene la particularidad de emplear energía solar fotovoltaica. Estos sistemas tienen cierta complejidad añadida dada la naturaleza de su fuente de energía, sin embargo, están constituyendo un referente de éxito en proyectos de cooperación internacional.

El funcionamiento de este tipo de instalación es en si sencillo. Los paneles solares puestos al Sol transforman la luz en electricidad que sirve para alimentar la bomba que extrae el agua del subsuelo. [26]

Cuando los paneles alimentan directamente a la bomba se produce una fluctuación del flujo del agua bombeada en función de la variación de la intensidad de la radiación solar a lo largo del día. Así en las primeras horas el flujo de agua será pequeño e irá aumentando conforme nos acercamos a las horas centrales del día cuando es máxima la radiación. A partir de este momento vuelve a descender hasta que se hace nulo en el momento de anochecer.

El uso de energía solar fotovoltaica como fuente de energía estuvo presente a finales de los años 70 en proyectos de agua y saneamiento, en la siguiente década se desarrollaron proyectos de iluminación y a partir de los 90 se han implementado programas a gran escala a lo largo del todo el mundo. A finales de siglo se estimaba su aplicación en más de 60.000 unidades de bombeo fotovoltaico. [26]

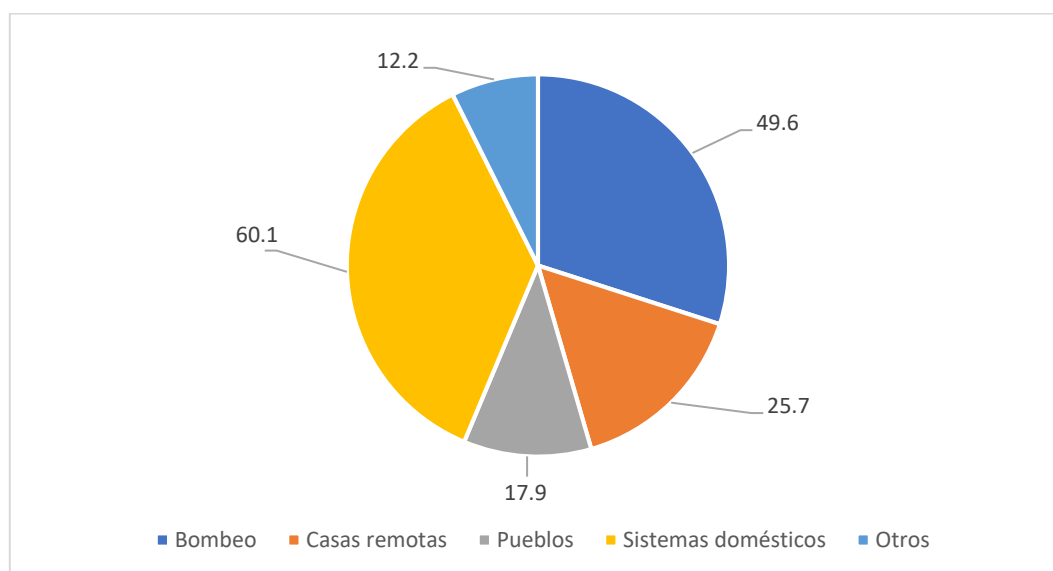


Figura 27 Uso de energía solar fotovoltaica en el medio rural (datos en MW_p). Fuente: Autor

Existen estudios que demuestran su competitividad frente a otras fuentes de energía, en unas condiciones de trabajo de entre 200 y 1500 $m^4/día$ (Sistema típico: 30 $m^3/día$; 20 m.) y que demuestra ser mejor opción que el Diesel en sistemas inferiores a 2000 $m^4/día$.

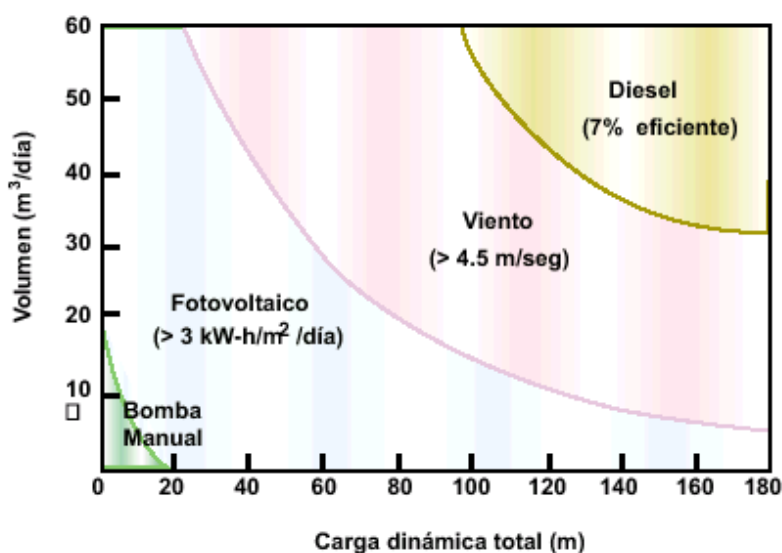


Figura 28 Fuentes de generación más apropiadas en función del volumen extraído y la carga dinámica. Fuente: [38]

El uso de esta tecnología en zonas rurales ha demostrado ser un éxito. En estas zonas las comunidades normalmente se encuentran relativamente aisladas o mal comunicadas, no suelen disponer de conexión a la red eléctrica y no disponen de grandes recursos económicos. Por esto la aplicación de esta tecnología es idónea para el caso, ya que permite suplir las necesidades de las comunidades de forma apropiada y sostenible.

Aparte de las ventajas inherentes a una fuente de energía renovable, existen otras ventajas con las que cuentan los sistemas de bombeo fotovoltaico:

- La aportación energética es mayor cuando es más necesaria.

En el caso de las instalaciones solares, la demanda hídrica suele estar en sincronía con la disponibilidad del recurso primario (la radiación solar es mayor en los meses de verano).

- Las fuentes descentralizadas de energía son adecuadas para el recurso hídrico disperso

La dispersión espacial del recurso hídrico (pozos, embalses, depósitos, etc.), así como de la propia demanda (cultivos, núcleos de población), favorece el uso de fuentes descentralizadas de energía (característica propia de recursos renovables, disponibles de forma uniforme en grandes áreas geográficas).

La disponibilidad del recurso solar es mayor en muchos países en vías de desarrollo, debido a su localización geográfica.

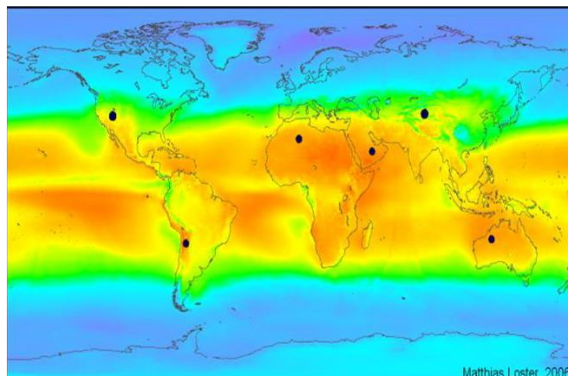


Figura 29 Distribución del recurso solar. [39]

2.5.1 Factores a tener en cuenta a la hora de realizar una instalación de un sistema de bombeo solar fotovoltaico

Para realizar con éxito la ejecución y la explotación de un sistema de bombeo fotovoltaico es de gran importancia tener en cuenta determinados aspectos:

Conocer la cantidad de agua necesaria

Es importante tener un conocimiento preciso del volumen de agua real necesario. Por lo general los propios usuarios desconocen la cantidad precisa que utilizan. Una mala estimación puede llevar a un diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico para un volumen que puede llegar a resultar insuficiente. Se recomienda contar con un especialista en la materia que ayude a determinar la cantidad de agua adecuada y contar con información de todas las fuentes posibles, pues influyen un gran número de factores

Este tipo de instalaciones se dimensionan en función del volumen de agua requerido y de la radiación solar disponible. Si el volumen de agua resulta ser insuficiente será imposible continuar bombeando, ya que no habrá más radiación solar.

Es recomendable calcular un volumen extra de agua de reserva para los días en los que pueda no haber radiación solar suficiente para el funcionamiento del sistema. Para esto habrá que realizar un dimensionado en función de las estadísticas de días consecutivos sin sol de la zona donde se encuentre la instalación.

En este tipo de instalaciones se da la coincidencia de que cuando hay sol y, por lo tanto, más calor y necesidad de agua, es cuando también hay más energía disponible para bombearla del subsuelo.

Determinar adecuadamente la profundidad del pozo en todas las estaciones

Es importante conocer el nivel del agua en el interior del pozo durante los momentos de abundancia (época lluviosa) y en los de escasez (sequías). Es posible que si no se tiene en cuenta este aspecto, en los momentos de sequía, con el nivel del agua bajo, la bomba carezca de potencia suficiente para bombear o sea en cantidad insuficiente. No se requerirá la misma potencia para elevar el agua desde una gran profundidad que desde una menor. Si una instalación está diseñada para bombear un volumen concreto de una profundidad, en los momentos en los que el nivel supere esta profundidad no se bombeará la cantidad suficiente de agua.

Es imperativo contar con un experto que determine correctamente las fluctuaciones de la capa freática a lo largo del año y también en función de los datos climáticos de la región en los ciclos de sequía de varios años.

Conocer la capacidad de recarga de los acuíferos

Antes de ejecutar una instalación hay que cerciorarse de que el acuífero tiene la suficiente capacidad de recarga para obtener de él regularmente la cantidad de agua que se precisa. De no ser así este terminará por agotarse y la instalación podría quedar totalmente inservible.

Por último, siempre se recomienda que la instalación la ejecute personal con la suficiente preparación. En caso de adquirir Kits de bombeo fotovoltaico siempre conviene asesorarse por personal cualificado capaz de adaptar el proyecto a la realidad de la comunidad. [27]

2.5.2 Tipos de sistemas de bombeo fotovoltaicos

Dentro de todos los tipos de sistemas de bombeo fotovoltaico podemos hacer una primera división

- **Sistemas de bombeo directo** (recomendado): Este tipo de sistemas tienen como única fuente de energía en generador fotovoltaico.
 - Pueden emplear motores AC o DC.
 - Pueden emplear bombas volumétricas o centrífugas
 - Sólo se bombea agua cuando existe radiación solar suficiente.
 - Utilizan depósitos de acumulación (Energía almacenada en forma de E. potencial del agua en altura)
- **Sistemas con generación de respaldo**: Este tipo de sistemas cuentan con un equipo de generación alternativo.
 - Generador Diesel
 - Banco de baterías (3 años de vida útil en clima tropical)
 - Conexión a red
 - Aerogenerador
 - Permiten explotar el recurso hídrico cuando no hay radiación solar suficiente.
 - Aumenta el coste, los problemas de mantenimiento y la vida útil del sistema.

El uso de sistemas con generación de respaldo debe tratar de evitarse en la medida de lo posible. Un buen diseño de un sistema de bombeo fotovoltaico debería ser capaz de funcionar de forma autónoma e independiente. Los sistemas de respaldo generan múltiples problemas añadidos, comprometen la sostenibilidad del proyecto y suelen generar un sobrecoste que repercute directamente en el usuario.

Se suele emplear el siguiente flujo de decisiones para considerar la implantación de un sistema de bombeo fotovoltaico:

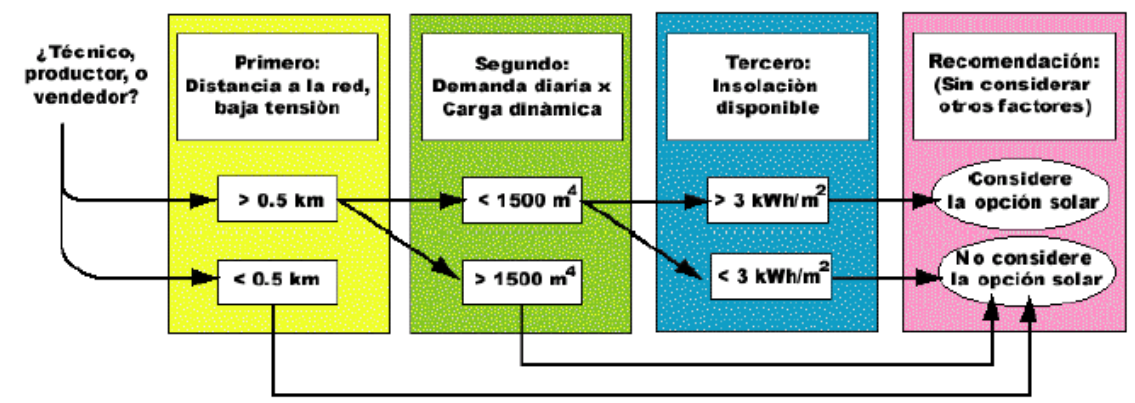


Diagrama de flujo de decisiones para bombeo considerando dos tecnologías de generación de energía.

Carga dinámica: Distancia entre el nivel del suelo y el nivel final del agua después de la prueba de bombeo. (m)

Insolación: Energía incidente en una superficie por unidad de superficie y a lo largo de un cierto tiempo. (kWh/m^2)

“Los elementos de un sistema de bombeo FV, se han de diseñar para operar en conjunto maximizando el rendimiento global del sistema. Es posible adoptar distintas soluciones para bombear un determinado volumen de agua a una altura, en función de los rangos de potencia requeridos en una aplicación específica. A pesar de que se instalan bombas tipo centrifugas de superficie y flotantes, la configuración más habitual, es la instalación de una bomba tipo sumergible instalada en un pozo de sondeo.”

“En los casos que se presentan en este estudio nos encontraremos con sistemas de bombeo fotovoltaico con bombas AC multietapa sumergibles y controladas por un variador de frecuencia. No obstante, cabe mencionar brevemente los tipos de sistemas de bombeo fotovoltaico más comunes.” [28]

Dentro de los sistemas de bombeo directo podemos encontrar tres casos, en función del tipo de la potencia instalada:

Sistema de bombeo directo de baja potencia:

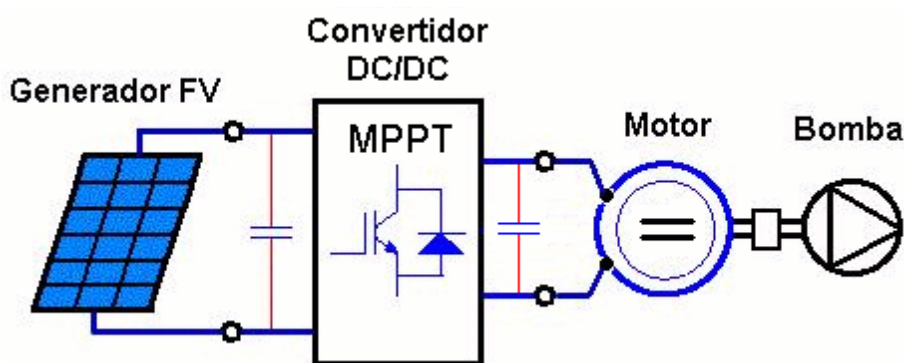


Figura 30 Configuración común de sistemas de bombeo directo de baja potencia

Se trata de sistemas de baja potencia (50 W, 400 W) que funcionan en corriente continua. Se utilizan bombas volumétricas DC y convertidores DC/DC con MPPT (seguidor de máxima potencia), aunque se pueden acoplar directamente al generador fotovoltaico prescindiendo de seguidor MPPT. En general son aplicaciones en el rango de los 150 m³/día. Algunos ejemplos de este tipo de sistemas son los sistemas Solarjack SDS y Shurflos 9300.

Los componentes fundamentales de estos sistemas son:

- Generador Fotovoltaico
- Convertidor DC/DC (opcional)
- Motor DC
- Bomba
- Depósito de almacenamiento (opcional)

Sistema de bombeo directo de media potencia

Este tipo de sistemas rondan potencias entre 400 y 1500 W_p . Se pueden distinguir dos configuraciones diferentes:

Sistemas con bomba centrífuga AC sumergible multietapa de frecuencia variable.

Necesitan un inversor de frecuencia variable con seguimiento MPPT como elemento de control. Son sistemas caracterizados por su elevada fiabilidad y amplia utilización desde las primeras instalaciones de bombeo FV. Su ciclo hidráulico está en el rango de 150 a 1500 m³/día.

El fabricante Grundfos ofrece un tipo de bomba (SQFlex) con un sistema de control integrado que permite trabajar en un amplio rango de voltajes, tanto AC como DC.

Los componentes fundamentales de estos sistemas son:

- Generador Fotovoltaico
- Convertidor DC/AC
- Motor AC
- Equipo de bombeo
- Depósito de almacenamiento (opcional)

Sistemas con motor DC sin escobillas

Sistemas formados por un motor DC sin escobillas operando una bomba helicoidal de desplazamiento positivo. El mayor rendimiento del motor DC sin escobillas, comparado con motores DC o AC de inducción, y el mayor rendimiento de las bombas helicoidales respecto de las centrífugas permiten obtener un sistema de mayor rendimiento global. No obstante, su introducción en el mercado es muy reciente y todavía han de demostrar su fiabilidad de operación y experimentar una disminución de costes. [28]

Sistema de bombeo directo de alta potencia

Se trata de sistemas con una potencia instalada del orden de varios kW_p . Constan de bombas centrífugas AC sumergibles accionadas por un inversor de frecuencia variable. Se utilizan en proyectos de abastecimiento de agua que necesiten volúmenes elevados de explotación (comunidades agrícolas, poblaciones grandes, etc.). Lo más habitual es encontrarlos en sistemas de regadío. [29]

En general

- Las bombas centrífugas con motores CC suelen acoplarse directamente al generador FV
- Las bombas de desplazamiento positivo con motores CC suelen acoplarse al generador FV mediante un convertidor CC.
- Los sistemas de bombeo con motores AC llevan un inversor (que puede además emplearse para hacer seguimiento del punto de máxima potencia)

Las cuatro configuraciones más comúnmente instaladas son:

- Bomba sumergible, con motor DC o AC y bomba centrífuga multi etapas. El número de etapas depende de la altura requerida.
- Bomba sumergible de desplazamiento positivo.
- Bomba flotante con motor DC y bomba centrífuga.
- Bombas instaladas en la superficie. Pueden ser centrífugas o volumétricas.

2.5.3 Componentes de un sistema de bombeo fotovoltaico

Un sistema de bombeo fotovoltaico de agua está compuesto por un generador FV, un sistema motor/bomba, un sistema de acondicionamiento de potencia y elemento de control entre el generador FV y el motor, un sistema de acumulación, un pozo (fuente) y un sistema de conducción. Los componentes de un sistema de abastecimiento de agua ya han sido desarrollados en anteriores apartados. A continuación, se procederá al estudio de los nuevos componentes incorporados por un sistema de bombeo fotovoltaico.

A pesar de que se instalan bombas de superficie y flotantes, la configuración más habitual es una bomba sumergible AC multietapa instalada en un pozo de sondeo. Este es el caso de los sistemas analizados en este estudio, uno de ellos con la particularidad de contar con un sistema de respaldo de conexión a red:

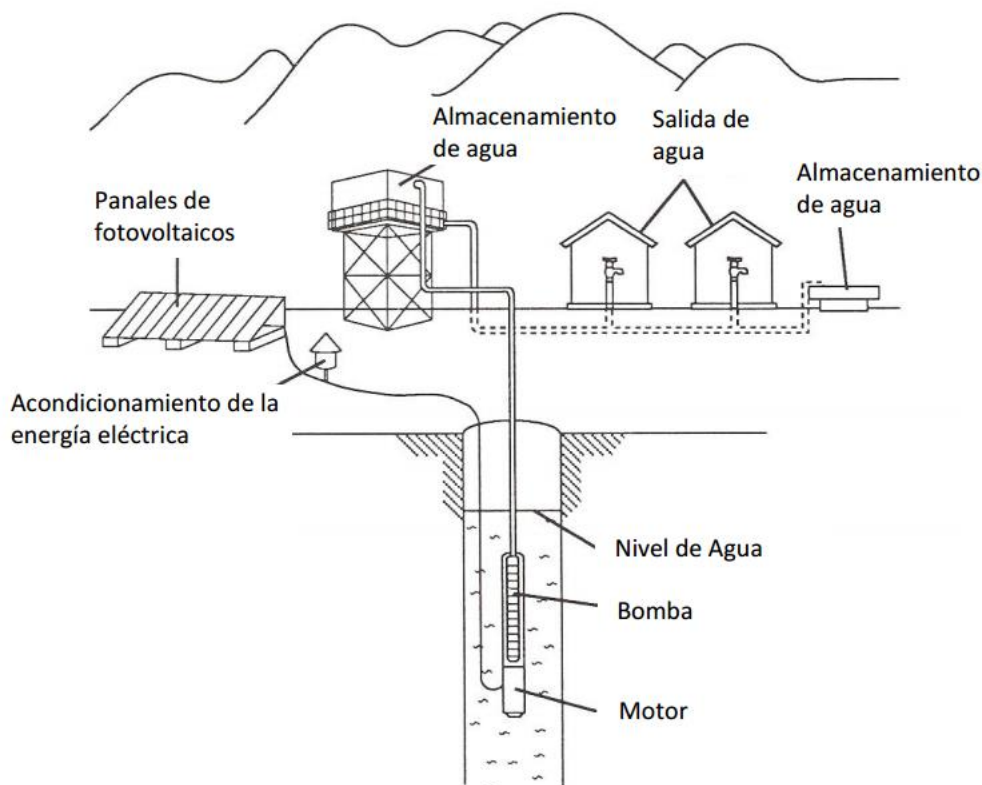


Figura 31 Esquema de un sistema de bombeo fotovoltaico

Paneles fotovoltaicos

Debido a que ya han sido debidamente analizados en anteriores apartados, no se profundizará de nuevo en este elemento. En proyectos de SBFV lo común es encontrar arreglos fotovoltaicos montados en una estructura fija, normalmente elevada. En Nicaragua, según datos y simulaciones de diferentes fuentes se recomienda, de forma general, su montaje con orientación Sur y un ángulo de inclinación $\beta = 15^\circ$.

Sistemas de acondicionamiento y control de la energía eléctrica

Un sistema de acondicionamiento y control está formado por aquellos elementos que adaptan las características de la energía producida por el generador FV (DC a tensión y corriente variables) a las requeridas por el motor. Las bombas más comunes han sido desarrolladas pensando en una fuente de potencia constante. En algunos casos estos elementos pueden encontrarse integrados en el conjunto motor-bomba, véase es caso de los modelos *Grundfos SQFlex*.

- **Los inversores DC/AC** son necesarios cuando se utilizan motores AC. Habitualmente incorporan un sistema de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) del generador FV. Es conveniente que los motores operen en niveles de potencia inferiores a la potencia nominal para disminuir el umbral de arranque y maximizar el número de horas de operación y la vida útil.
- **Los sistemas de control de bombeo por variación de frecuencia** se utilizan en sistemas de bombeo trifásico AC. Se basan en el control de la velocidad de giro de la bomba mediante la variación de la frecuencia de la tensión de alimentación del motor, aplicando una tensión proporcional a ella de modo que el flujo en la máquina permanece constante.
- **Los convertidores DC/DC** se utilizan como elemento sincronizador entre el generador FV y el motor DC. Pueden disponer de tecnología MPPT, pero habitualmente operan a tensiones constantes. La utilización de MPPT es recomendable porque aumenta el rendimiento del sistema. En el caso de bombas de volumétricas puede incrementar hasta en un 30% el volumen diario de agua bombeada. Este incremento es menor en el caso de motores DC accionando bombas centrífugas. El modo más simple de regular la velocidad de un motor CC es variando la tensión de inducido debido a que la velocidad de un motor de corriente continua es directamente proporcional a ella.
- **Los conmutadores de sistemas de respaldo** son elementos propios de sistemas de bombeo con generación de respaldo. Estos controladores son los encargados de conectar las diferentes opciones de generación para proveer de energía a la bomba, ya sea de forma manual o automática. En el caso de sistemas con control automático el cambio se produce de forma autónoma al detectar condiciones límite de funcionamiento en la fuente primaria de energía.
- **Los elementos de seguridad** son muy variados (fusibles, seccionadores, diferenciales, sistema de apagado de la bomba, etc.) Es habitual la instalación de estos elementos de seguridad en un panel aislado y certificado para trabajo en condiciones tropicales (en el caso de Nicaragua) y emplear este como centro de conexión de todos los elementos de acondicionamiento y control.
- **Los sensores de nivel** se utilizan, principalmente, para desconectar el sistema de bombeo una vez la pila de almacenamiento está llena y no desperdiciar agua. Existen bombas que cuentan con sensores de funcionamiento en seco. Estos cortan automáticamente la energía aportada a la bomba si detectan que el nivel de agua ha descendido lo suficiente para ponerla en peligro. Una bomba funcionando en seco corre un grave riesgo de ser dañada permanentemente y la sustitución de esta pieza del sistema acarrea un gasto enorme para una comunidad rural.

Sistema motor/bomba

Los sistemas de bombeo están formados por un motor eléctrico, AC o DC, que acciona la parte hidráulica de la bomba a partir de la energía eléctrica que le es suministrada. La gran mayoría de estos elementos se encuentran integrados en un único dispositivo al que llamaremos conjunto motor7bomba o, simplemente, bomba.

En los casos de este estudio nos encontramos con bombas sumergibles, por lo que es el tipo de bomba que analizaremos a continuación:



Figura 32 Bomba sumergible. [29]

Se trata de bombas centrífugas accionadas por un motor eléctrico. Tienen una geometría cilíndrica y muchas de ellas son multietapa, es decir, se pueden añadir más secciones para aumentar la potencia de bombeo. Estas bombas se instalan, comúnmente, en pozos de sondeo a una cierta profundidad. Muestran un gran rendimiento y trabajan muy bien como elementos de un sistema de bombeo fotovoltaico.

Pueden alimentarse, según el modelo de la bomba, de energía AC o DC (o incluso de ambas en algunos casos). Disponen de mecanismos integrados de control de velocidad, ya sea por variación de frecuencia en AC o por tensión inducida en DC.

El mayor peligro de estas bombas es el funcionamiento en vacío, ya que se trata de bombas sumergibles que normalmente se encuentran inaccesibles. El control de los niveles del pozo es de vital importancia para evitar este efecto. Muchos de los sistemas de control de estas bombas incorporan sensores de funcionamiento en seco para evitar tal efecto, pero como comprobaremos más adelante no está exento de problemas.

Las bombas, al igual que otros elementos, pueden instalarse de forma combinada en serie o paralelo según interese incrementar el caudal o la altura de bombeo. En las siguientes gráficas observamos ambos casos:

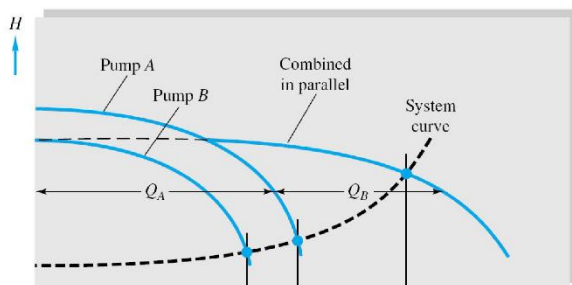


Figura 34 Asociación de bombas en paralelo

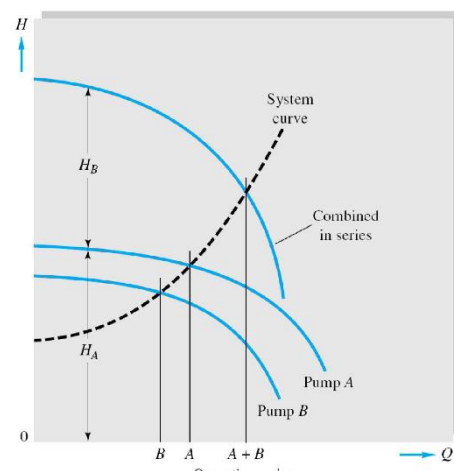


Figura 33 Asociación de bombas en serie

2.6 Dimensionado de un sistema de bombeo fotovoltaico

El dimensionado de sistemas de bombeo fotovoltaico es un estudio complejo debido a la naturaleza de estos sistemas. Existen diversos métodos de dimensionado, dependiendo de su complicación, del número de variables consideradas y del grado de optimización en la obtención de resultados. Por norma general podemos definir tres etapas:

- Determinación de necesidades hidráulicas
- Análisis del recurso fotovoltaico
- Definición de los equipos necesarios

De manera general está basado en el cálculo de valores medios mensuales de energía hidráulica necesaria y de radiación solar disponible. Se calculará el balance energético mensual para obtener el mes cuya demanda de agua es mayor en relación con la energía solar disponible. El dimensionado del sistema se hará teniendo en cuenta que este debe ser capaz de satisfacer la demanda de agua en el mes más crítico. Esto es conocido como “criterio del mes peor”.

Ciertos fabricantes como Grundfos, Lorentz o Franklin Electric ofrecen un servicio web de dimensionado de sistemas

Previamente a este estudio se debe contar con un estudio completo del sondeo, en el cual se debe incluir la siguiente información:

Ensayo de bombeo: evalúa la evolución del nivel de agua en un sondeo bombeando a caudal constante. Existen diversas formas de documentarlos, pero todos llevan una recomendación de caudal de explotación y una medida de la caída del nivel de agua a ese ritmo. Se recomienda realizar ensayos de larga duración (24 horas).

Perfil del sondeo: geometría del sondeo, estratos y diámetros de perforación. El diámetro condiciona el tamaño máximo de la bomba y, como la bomba se instala en tramos de camisa, la disposición entre camisa y filtros determina dónde puede instalarse. La profundidad del primer filtro determina la caída máxima del nivel del agua para evitar el funcionamiento “en seco” de la bomba.

Análisis de agua: determina si el agua de la fuente es apta para su consumo y ayuda a anticipar la corrosión.

Acceso a la energía: Punto más cercano de suministro eléctrico.

Condiciones técnicas de funcionamiento: longitud de la línea de conducción, diferencia de alturas en el terreno, etc.

Normativa del país.

Una vez determinado que el sondeo es una fuente de explotación viable se procederá a determinar las necesidades hidráulicas y energéticas. [30]

2.6.1 Determinación de necesidades hidráulicas

Lo primero que hay que definir a la hora de dimensionar un sistema de bombeo fotovoltaico es el volumen diario de agua consumido. El cálculo del consumo diario depende de muchos factores y no es algo sencillo de calcular. Lo ideal es contar con la mayor información posible acerca de la comunidad, su entorno, actividades productivas, etc. La gran mayoría de los proyectos de bombeo fotovoltaico fracasan por una determinación errónea del consumo a largo plazo, ya que una comunidad puede evolucionar de múltiples maneras.

Según los datos de la OMS [31] el volumen de agua que garantiza unas condiciones básicas de salud e higiene es de 50 litros por persona y día. Existe una extensa discusión acerca de este dato y podemos encontrar variaciones en diferentes estudios. A continuación, se ofrecen algunos datos de referencia:

Tabla 5 Consumos estimados de agua [32]

	Litros/día
Habitante urbano	50
Habitante rural	30
Refugiado (emergencia)	15
Aves de corral	0.1
Ganado vacuno	40
Caballo	50
Huerta (0.1 ha)	500

Podemos realizar un predimensionado a partir de dos parámetros básicos:

- $Q_d = \text{Caudal diario } (m^3/día)$
- $H_t = \text{Altura total de bombeo } (m)$

A partir de dos datos tales como el consumo diario estimado y la diferencia de altura entre la bomba y el depósito podemos calcular:

$$C_d = Q_d \cdot H_t$$

$$P = \frac{C_d - 49.14}{1.54}$$
$$A_p = P \cdot \frac{0.6 (m^2)}{100 (W_p)}$$

- $C_d = \text{Carga dinámica } (m^4/día)$
- $P = \text{Potencia del generador fotovoltaico } (W_p)$
- $A_p = \text{Área de paneles } (m^2)$

En esta estimación no se han tenido en cuenta muchos parámetros relevantes para el funcionamiento del sistema y no es más que una primera aproximación al dimensionamiento de un sistema, sin embargo, puede resultar una herramienta útil.

Por lo general la demanda hídrica es estacional y varía en los distintos meses del año, por lo que es necesario hacer una estimación mes a mes. En climas con grandes diferencias entre estación seca y lluviosa es de vital importancia tener esto en consideración. De igual manera, los hábitos de consumo de las personas generan una demanda irregular a lo largo del día, lo que hace necesario el dimensionado de sistema de almacenamiento para suplirla de forma continua.

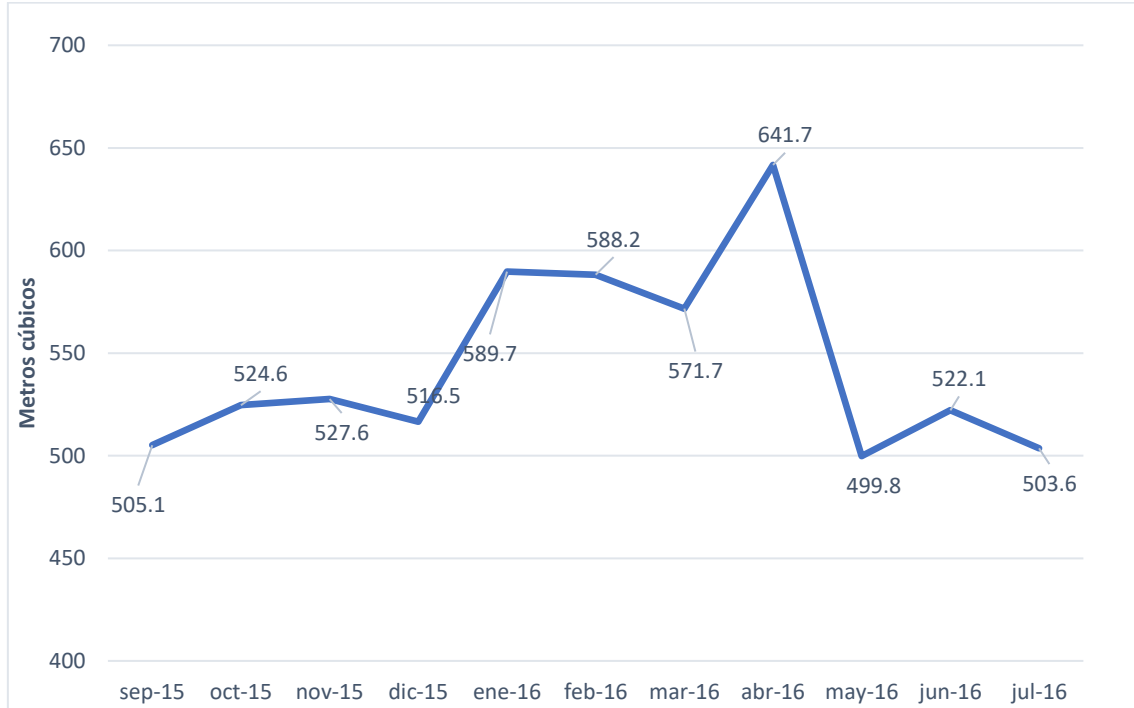


Figura 35 Ejemplo de demanda desarrollado a partir de los datos de consumo de la comunidad de “El Limón”

Para la determinación de las necesidades hidráulicas se ha de calcular, mes a mes, el volumen demandado y la energía de bombeo necesaria asociada. Para ello empleamos las siguientes ecuaciones: [32]

$$E_B = \frac{E_H}{\eta_B} = \frac{\rho g Q_d H_{te}}{3600 \eta_B}$$

$$H_{te} = H_d + H_{st} + (H_{dt} - H_{st}) \left(\frac{Q_d}{Q_t} \right) + H_p$$

- E_B = Energía diaria de la bomba (Wh/día)
- E_H = Energía diaria hidráulica (Wh/día)
- η_B = Rendimiento medio diario (40~50% en bombas sumergibles AC)
- ρ = Densidad del agua (1000 kg/m³)
- g = Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)
- H_{te} = Altura total equivalente (m)
- H_d = Altura de depósito (m)
- H_{st} = Altura estática (m)
- H_{dt} = Altura dinámica (m)
- H_p = Altura equivalente de perdidas (m)
- Q_t = Caudal prueba de capacidad (m³/día)
- Q_d = Caudal diario (m³/día)

La determinación de la altura total equivalente (H_{te}) es determinante para el diseño de un SBFV. Para calcular dicho parámetro es necesario explicar, en primer lugar, un fenómeno que ocurre al bombear un pozo de sondeo: el abatimiento.

El acuífero en reposo tiene una superficie aproximadamente horizontal. La profundidad a la que se encuentra el agua, medida desde la boca del sondeo, se llama nivel estático. Cuando se empieza a bombear a través de un sondeo, se forma una depresión con forma de cono en el agua, similar al remolino de un desagüe, con el centro en el sondeo.

El nivel de agua desciende apreciablemente hasta un nuevo nivel, el nivel dinámico. La forma del cono depende del caudal. Cuanto más caudal se bombea, más abrupto es el cono de depresión y más bajo se sitúa su vértice. La caída del nivel medida desde el nivel estático es el abatimiento. Cuanto más bajo se encuentre el nivel del agua a bombear más energía será necesaria aportar a la bomba, por eso la importancia de este efecto y su contribución a la H_{te} .

La diferencia entre el nivel estático y el dinámico permite una primera aproximación a la capacidad del sondeo. Los sondeos más productivos son aquellos en que el cono se forma muy lentamente. Se necesitan grandes caudales para separar el nivel estático del dinámico.

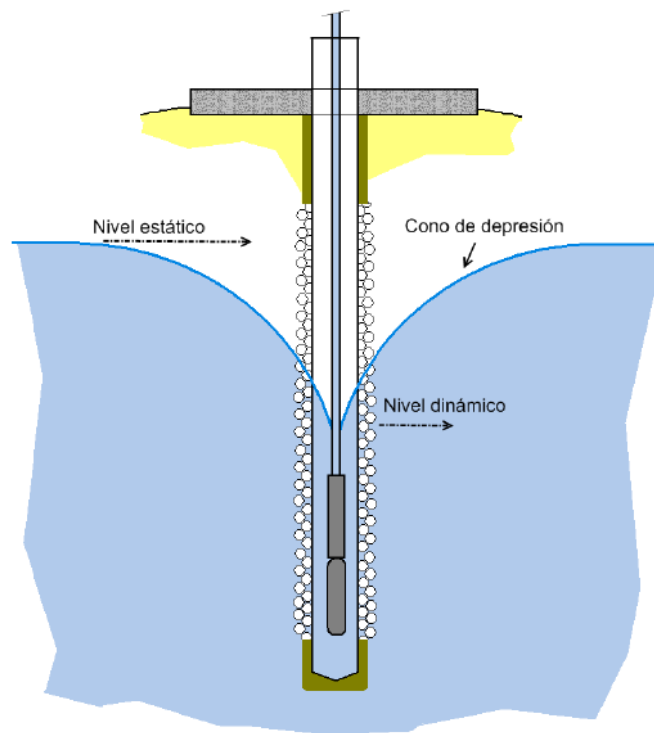


Figura 36 Abatimiento en un pozo perforado. [30]

Otro parámetro importante es la altura equivalente de pérdidas, lo cual no es sino la traducción de las pérdidas de carga del sistema en una altura equivalente a la pérdida de presión asociada.

Existen dos tipos de pérdidas de carga:

- **Pérdidas distribuidas:** es el resultado de la fricción producida por un líquido al circular por el interior de una tubería
- **Pérdidas locales:** son aquellas pérdidas asociadas a elementos puntuales del circuito con geometrías particulares (válvulas, codos, etc.)

Pérdidas distribuidas

Existen varias formas de calcular las pérdidas distribuidas en un circuito hidráulico con mayor o menor precisión. Las pérdidas de carga distribuidas dependen de la longitud de la tubería, su diámetro y el coeficiente de fricción, el cual a su vez depende de la rugosidad del interior de la conducción y de las condiciones del flujo (laminar o turbulento). A continuación, presentaremos dos métodos de cálculo: el diagrama de Moody y la fórmula de Hazen-Williams.

Mediante el método del diagrama de Moody la altura equivalente de pérdidas distribuidas puede calcularse mediante la siguiente expresión:

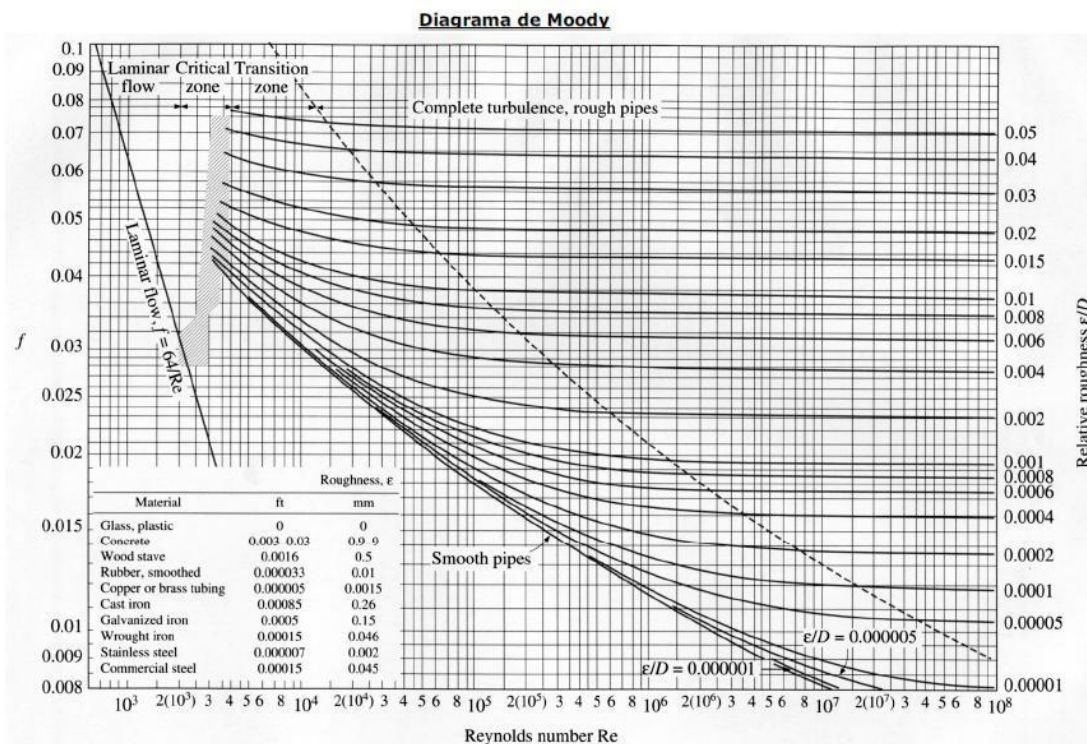
$$H_{pd} = f \cdot \frac{Lv^2}{d2g}$$

- H_{pd} = Altura equivalente de pérdidas distribuidas (m)
- f = coeficiente de fricción
- L = longitud de tubería (m)
- v = velocidad media del fluido (m/s)
- d = diámetro hidráulico de la tubería (m)
- g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

Para calcular el coeficiente “ f ” utilizaremos el diagrama de Moody, para lo cual debemos haber calculado previamente el número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

- ρ = densidad del fluido (kg/m^3)
- μ = viscosidad del fluido (Pa s)
- d = diámetro hidráulico de la tubería (m)
- v = velocidad media del fluido (m/s)



Otro método más simple para calcular pérdidas de carga distribuidas es mediante la fórmula de Hazen-Williams, suponiendo que nos encontremos en condiciones tales que garanticen un flujo turbulento. Se emplea la siguiente expresión:

$$H_{pd} = 10.62 L \cdot \frac{Q^{1.85}}{C^{1.85} d^{4.87}}$$

- H_{pd} = Altura equivalente de pérdidas distribuidas (m)
- L = longitud de tubería (m)
- Q = caudal (m^3/s)
- d = diámetro hidráulico de la tubería (m)
- C = coeficiente de Hazen – Williams

Tabla 6 Coeficientes de Hazen-Williams para diferentes materiales

Plásticos	$C = 140$
Cemento	$C = 135$
Hormigón armado	$C = 130$
Aero nuevo	$C = 120$
Acero usado	$C = 110$
Fundición nueva	$C = 100$
Fundición usada	$C = 90$

Pérdidas locales

Las pérdidas de carga locales se deben a los distintos elementos del sistema y su geometría. Se pueden calcular mediante la siguiente expresión:

$$H_{pl} = K \cdot \frac{v^2}{g}$$

- H_{pl} = Altura equivalente de pérdidas locales (m)
- v = velocidad media del fluido (m/s)
- g = aceleración de la gravedad ($9.81 m/s^2$)
- K = coeficiente de pérdida de un accesorio

Tabla 7 Coeficientes k de pérdidas locales [32]

Accesorio	Coeficiente K
Unión depósito-tubería (conexión a ras de pared)	0.5
Unión depósito-tubería (tubería rasante)	1.0
Unión depósito-tubería (conexión abocinada)	0.005
Codo 45°	0.35 - 0.45
Codo 90°	0.50 – 0.75
Conexión en T	1.50 – 2.00

Pérdidas totales

La altura equivalente de pérdidas totales es la suma de pérdidas distribuidas y puntuales:

$$H_p = H_{pd} + H_{pl}$$

- H_p = *Altura equivalente de perdidas (m)*

2.6.2 Determinación del recurso solar

Una vez determinadas las necesidades hidráulicas del sistema hemos de calcular el recurso solar disponible para diseñar un sistema que, a partir de la energía solar de que disponemos, nos permita satisfacer las necesidades hidráulicas. Para dimensionar sistemas de abastecimiento de comunidades lo común es emplear el criterio del “mes peor”, como previamente se expuso.

El recurso solar disponible en una zona determinada es un dato al que se puede acceder a través de diferentes plataformas y bases de datos. Las más utilizadas son la de CM SAF (Satellite Application Facility on Climate Monitoring) para datos en Europa, Asia y África y la de la NASA para datos a nivel mundial. Igualmente se puede calcular la inclinación “ β ” óptima para el aprovechamiento del recurso solar durante todo el año o para un mes concreto. Cabe destacar que el ángulo de azimut “ α ” será de 0° y el ángulo de inclinación “ β ” debe ser como mínimo de 10° por condiciones de limpieza y estructurales. Para calcular la irradiación media emplearemos las siguientes expresiones: [32]

$$G_{dm}(\alpha, \beta) = G_{dm}(0) \cdot F_i \cdot F_s \cdot K$$

$$K = \frac{G_{dm}(0^\circ, \beta_{opt})}{G_{dm}(0)}$$

$$F_i = 1 - \left(1.2 \cdot 10^{-4}(\beta - \beta_{opt})^2 + 3.5 \cdot 10^{-5}\alpha^2 \right) \text{ para } 15^\circ < \beta < 90^\circ$$

$$F_i = 1 - \left(1.2 \cdot 10^{-4}(\beta - \beta_{opt})^2 \right) \text{ para } \beta \leq 15^\circ$$

- $G_{dm}(\alpha, \beta)$ = irradiación media diaria (Wh/m²día)
- $G_{dm}(0)$ = irradiación media diaria sobre la horizontal (Wh/m²día)
- F_i = factor de irradiación
- F_s = factor de sombreado
- β_{opt} = ángulo óptimo de inclinación

A través de bases de datos y los consiguientes cálculos podemos obtener valores de irradiación media diaria para los distintos meses del año. El “mes peor” será aquél en el que las condiciones de funcionamiento sean las más exigentes. Esto se puede reflejar mediante la siguiente expresión, siendo el mes peor aquel cuyo mayor sea el siguiente cociente:

$$\frac{E_B}{G_{dm}(\alpha, \beta)}$$

- E_B = Energía requerida por la bomba (Wh/día)
- $G_{dm}(\alpha, \beta)$ = irradiación media diaria (Wh/m²/día)

[32]

Una vez determinado el mes peor dimensionaremos todo el sistema para estas condiciones de funcionamiento, ya que serán las más desfavorables. A partir de las necesidades hidráulicas y el recurso solar disponible dimensionaremos el generador fotovoltaico.

$$A = \frac{E_B}{G_{dm}(\alpha, \beta) \eta_{fv}}$$

$$\eta_{fv} = F_m(1 - \delta(T_m - 25))\eta_{CEM}$$

- A = área de paneles (m^2)
- η_{fv} = rendimiento del generador FV en condiciones reales de operación
- F_m = factor de acoplo medio (0.95 en sistemas con seguidor MPPT)
- δ = coeficiente de variación de potencia por temperatura (0.0045 Si mono)
- T_m = temperatura media diaria de los módulos ($^{\circ}C$)
- η_{CEM} = rendimiento de las células FV en condiciones estandar de medida

La potencia pico generada por el arreglo fotovoltaico se define en la siguiente ecuación:

$$P_p = A \cdot \lambda_{CEM} \cdot \eta_{CEM}$$

- P_p = potencia pico del generador (W_p)
- λ_{CEM} = irradiancia en condiciones estandar de medida (1000 W/m^2)
- A = área de paneles (m^2)
- η_{CEM} = rendimiento de las células FV en condiciones estandar de medida

Sustituyendo:

$$P_p = \frac{\rho g Q_d H_{TE} \lambda_{CEM}}{3600 G_{dm}(\alpha, \beta) F_m(1 - \delta(T_m - 25))\eta_B}$$

De forma simplificada podemos sustituir el factor de corrección de la temperatura en función del clima:

- $1 - \delta(T_m - 25) = 0.8$ (en climas cálidos)
- $1 - \delta(T_m - 25) = 0.9$ (en climas fríos)

La temperatura media de operación de las células se puede aproximar a partir de la temperatura ambiente media y la irradiancia global incidente:

$$T_m = T_a + 0.03 \lambda$$

- T_m = temperatura media diaria de los módulos ($^{\circ}C$)
- T_a = temperatura ambiente media ($^{\circ}C$)
- λ = irradiancia global incidente (W/m^2)

Si se conoce la temperatura de operación nominal se puede calcular la temperatura de célula a través de la siguiente expresión:

$$T_m = T_a + \lambda \cdot \frac{T_{ONC} - 20}{800}$$

- T_{ONC} = temperatura de operación nominal de la célula ($^{\circ}C$)

2.6.3 Selección de componentes

El último paso en el dimensionado de un sistema de bombeo fotovoltaico es la selección de los componentes. Partiendo de los datos obtenidos previamente podemos consultar las especificaciones técnicas de diversos fabricantes para elegir los elementos apropiados.

Selección de paneles

Como se ha explicado con anterioridad existen múltiples configuraciones serie/paralelo posibles en un arreglo fotovoltaico. Para dimensionar el sistema de generación hemos de calcular, en función de los voltajes nominales de los módulos y el motor, el número de módulos en serie y paralelo. Utilizaremos las siguientes expresiones:

$$n_{\text{serie}} = \frac{V_{N\text{motor}}}{V_{oc}} \quad n_{\text{paralelo}} = \frac{P_p}{N_{\text{serie}} \cdot P_{p\text{mod}}} \quad P_p = N_{\text{serie}} \cdot N_{\text{paralelo}} \cdot P_{p\text{mod}}$$

- P_p = potencia pico del generador (W_p)
- $P_{p\text{mod}}$ = potencia pico del módulo FV (W_p)
- n_{serie} = número de módulos en serie
- N_{serie} = número entero por encima de n_{serie}
- n_{paralelo} = número de módulos en paralelo
- N_{paralelo} = número entero por encima de n_{paralelo}
- $V_{N\text{motor}}$ = tensión nominal del motor (V)
- V_{oc} = tensión de circuito abierto del módulo FV (V)

Selección de la bomba

Normalmente se emplean dos parámetros para la selección de bombas: el caudal pico y la altura total equivalente. Para realizar este cálculo es necesario introducir en concepto “Horas Solares Pico” (HSP), lo cual es el número de horas equivalentes en las que el sol proporciona una irradiancia estándar de 1000 W/m^2 . Se emplean las siguientes ecuaciones:

$$\text{HSP} = \frac{G_{dm}(\alpha, \beta)}{1000 \text{ (W/m}^2\text{)}}$$

$$Q_p = \frac{Q_d}{\text{HSP}}$$

- HSP = horas solares pico (h/día)
- $G_{dm}(\alpha, \beta)$ = irradiación media diaria ($\text{Wh/m}^2/\text{día}$)
- Q_d = caudal diario ($\text{m}^3/\text{día}$)
- Q_p = caudal pico (m^3/h)

$$Q_p = \frac{P_p \eta_{pico}}{\rho g H_{TE}}$$

- P_p = potencia pico del generador (W_p)
- η_{pico} = rendimiento pico del conjunto motor – bomba
- H_{te} = *Altura total equivalente* (m)
- Q_p = caudal pico (m^3/s)
- ρ = densidad del fluido (kg/m^3)

Para seleccionar entre diferentes modelos de bomba los fabricantes ofrecen una amplia gama de herramientas, desde catálogos y hojas de características hasta servicios webs ([Grundfos](#)). Para seleccionar una bomba apropiada es necesario encontrar el modelo que mejor se adapta a esas condiciones de trabajo (H_{te} , Q_p) y para ellos se utilizan las curvas características de las bombas:

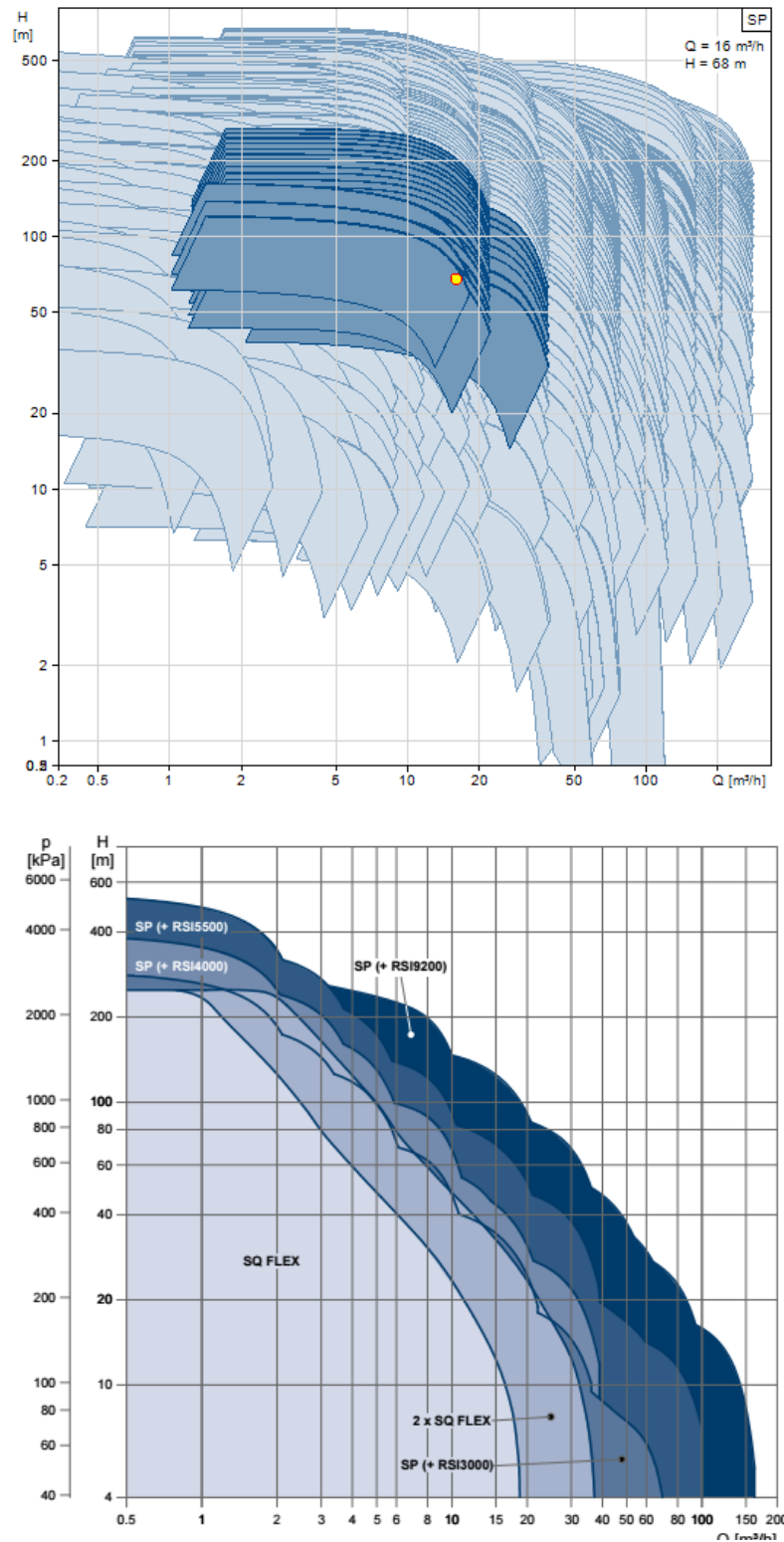


Figura 37 Curvas características de la familia de bombas Grundfos SQFlex. [29]

Selección del sistema de almacenamiento

El sistema de almacenamiento de agua, como hemos visto anteriormente, es un componente crítico de un sistema de bombeo fotovoltaico. El dimensionamiento del mismo no puede tomarse a la ligera, ya que influyen factores de diversa naturaleza.

En un sistema de bombeo fotovoltaico directo, sin sistema de respaldo, el almacenamiento de agua en altura sirve como sistema de acumulación de energía (potencial en este caso). Un SBFV no tiene capacidad para bombear agua fuera de las horas de suficiente recurso solar, por lo tanto, necesita contar con un elemento que permita ofrecer un suministro continuo. En lugar de almacenar energía química en baterías o combustibles fósiles se hace en forma de energía potencial.

Un sistema de almacenamiento ha de contar con la capacidad necesaria para suplir las necesidades de sus usuarios de forma continua e ininterrumpida, mantener la presión necesaria para el funcionamiento del circuito y controlar las condiciones del agua de consumo (mediante filtros, elementos cloradores, etc.)

Para estimar correctamente la capacidad del sistema hemos de contar con un perfil de la demanda y otro del bombeo. Cabe destacar las diferencias que puedan existir entre diferentes meses del año, pero también hay que contar con que la demanda diaria es característica de las condiciones socioculturales de sus usuarios.

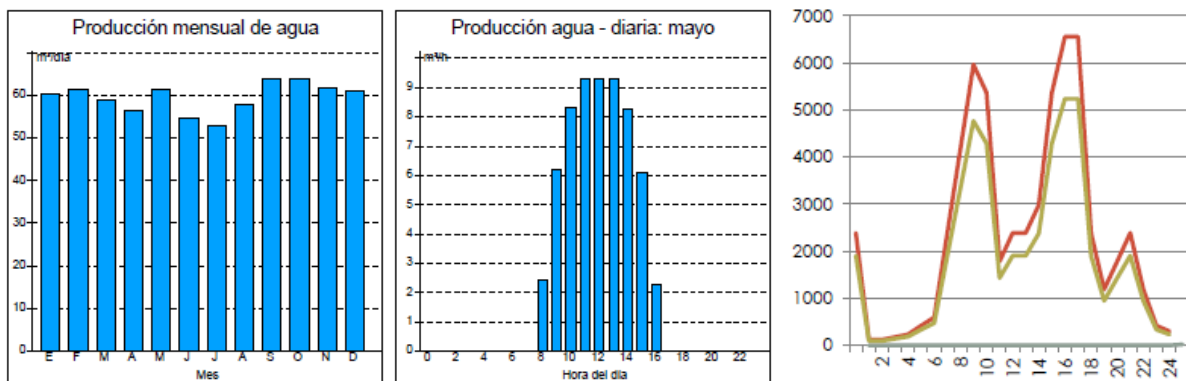


Figura 38 Ejemplos de patrones de producción y consumo de agua

Por lo general se recomienda que el sistema tenga una capacidad como mínimo del doble del consumo diario, se encuentre elevada sobre los grifos entre 1 y 10 metros y disponga de una salida de agua 20 centímetros por encima del depósito. La instalación de elementos cloradores debe realizarse en la entrada de agua del depósito y debe protegerse lo mejor posible de elementos contaminantes.

Eficiencia de un sistema de bombeo fotovoltaico

Para tener una aproximación de la eficiencia de un SBFV y comparar entre ellos podemos usar la siguiente relación:

$$\epsilon_{SBFV} = \frac{Q_d}{P_p}$$

- ϵ_{SBFV} = eficiencia del SBFV (l/W_p día)
- Q_d = caudal diario bombeado (l/día)
- P_p = potencia pico instalada (W_p)

3. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE BOMBEO FOTOVOLTAICO REALES

3.1 Introducción al estudio

El siguiente estudio es la síntesis del trabajo de campo realizado en dos comunidades rurales de Nicaragua y su posterior análisis y evaluación. Este estudio se realizó en el marco del “Programa de Voluntariado Internacional de las Universidades Públicas de la Comunidad Madrid” en su IXª edición en 2016. Durante dicho programa estuve trabajando en colaboración con el Centro de Investigación en Energías Renovables (CIER) en Estelí de la UNAN-Managua. Una de las líneas principales de trabajo de dicho centro es la investigación en abastecimiento básico de energía y agua, concretamente en el campo del bombeo solar fotovoltaico.

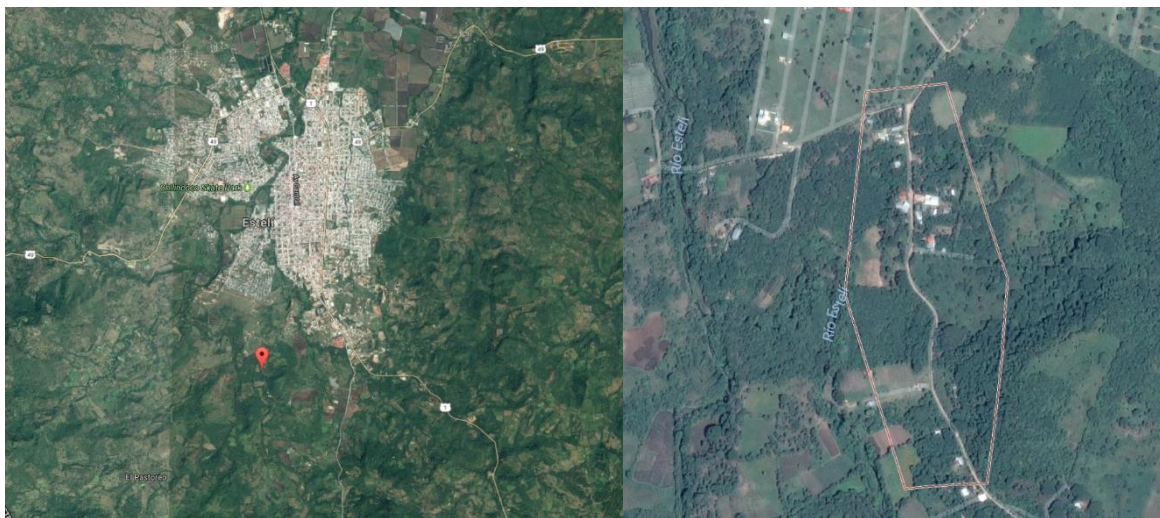
El objetivo de este estudio es realizar un análisis técnico del funcionamiento de dos sistemas de bombeo fotovoltaico del ámbito rural, así como de la relación de la comunidad con estos. Para ello se contactó con ambas comunidades y se explicó la naturaleza del trabajo que se iba a realizar. Con la aprobación de las comunidades se realizaron diversas actividades de campo a lo largo de la duración del proyecto, principalmente:

- Contacto con líderes y CAPS, presentación del estudio y fortalecimiento de relaciones.
- Inspección de los diferentes elementos del sistema e identificación de modelos.
- Mediciones experimentales de diferentes parámetros.
- Encuestas a la población.
- Dinámicas de grupo con los miembros de los CAPS.
- Exposición de resultados e identificación conjunta de problemas.

Entre ambas comunidades existen grandes diferencias. No se trata únicamente de los aspectos técnicos relativos al funcionamiento del sistema, el número de usuarios, su organización y muchos otros factores determinantes son distintos. Por estos se procederá al estudio de cada comunidad de forma independiente para posteriormente realizar una comparación entre ambas, identificar problemas comunes y consecuencias de las particularidades de cada uno.

3.2 El Limón

“El Limón” es una comunidad rural situada a 1.5 kilómetros al sur-oeste del casco urbano del municipio de Estelí, región central Norte de Nicaragua, entre las coordenadas 13°03'02.15" latitud norte y 86°21'44.80" latitud oeste, a una altitud 870 msnm. La temperatura promedio anual de 23 °C y acumulado de precipitación de 800 milímetros.



Imágenes vía satélite de la comunidad de “El Limón”. Fuente: Google Maps.

Se trata de una comunidad rural agrícola y ganadera compuesta por 56 domicilios que agrupan un total de 186 habitantes de la comunidad, según el estudio realizado en 2016 por miembros de la FAREM. Debido al crecimiento de la ciudad de Estelí, actualmente se encuentra en el área periurbana, contando con acceso a la red eléctrica.

Se encuentra situada junto al río Estelí, el cual ha sufrido graves problemas de sequía a lo largo de los últimos años y cuyo cauce ha tenido que ser acondicionado en diversas ocasiones. En primer lugar, los habitantes de la comunidad, no tan numerosa por entonces, explotaban dos pequeños pozos manuales mediante sistemas tradicionales. Los acuíferos de la zona se encuentran a una cierta profundidad, lo que complica el acceso al agua mediante métodos tradicionales.



Vía principal de la comunidad de “El Limón”. Fuente: Autor



Cultivo de frijol rojo, principal actividad desarrollada en la comunidad de "El Limón" Fuente: Autor

En el año 2005 el río se secó completamente, lo que promovió la actuación de la comunidad. Se instaló una bomba de mecate, mejorando la capacidad de explotación de los pozos, y se comenzó a organizar un proyecto para un sistema de abastecimiento mejorado, recogiendo fondos entre los miembros de la comunidad. Amigos de miembros de la comunidad se unen al proyecto y participan activamente en el desarrollo del mismo. Cabe destacar la participación de varios extranjeros que ayudaron en la recolección de fondos para el sistema: Hannah Curtis (Escocia) y Benjamín Rushwald (EEUU).

Entre 2005 y 2006 se realizan las primeras capacitaciones de los miembros del comité, comienza aquí el comité que precederá a la formación del CAPS. Por aquel entonces la comunidad se organiza en torno a grupos locales, los cuales tienen relación con los brigadistas de salud y limpieza y evolucionarán hasta conformarse como CAPS. Entre abril de 2006 y noviembre de 2007 se lleva a cabo el proyecto de implementación de un SBFV en la comunidad de "El Limón".



Reunión con los miembros del CAPS de la comunidad de "El Limón" Fuente: Autor

3.2.1 Descripción del sistema

El sistema de bombeo fotovoltaico de la comunidad de “El Limón” es un sistema híbrido con conexión de respaldo a red eléctrica. Este SBFV fue implementado antes de que se desarrollara la infraestructura de suministro energético y, por tanto, pensado para operar en unas condiciones diferentes a las actuales.

El crecimiento de la comunidad de “El Limón” y las nuevas inversiones en infraestructura están atrayendo a personas de zonas cercanas y se pueden observar varias viviendas en proceso de edificación a lo largo de la comunidad.

El sistema de generación y bombeo está compuesto, básicamente, por un generador fotovoltaico, un sistema de control y una bomba sumergible. Los elementos de control y bombeo son productos de la marca “Grundfos”, concretamente de la familia “SQFlex”. Esta familia de productos tiene la particularidad de poder operar en una amplia gama de voltajes, tanto en AC como en DC. Cuenta con un control de velocidad de la bomba por variación de frecuencia y seguidor MPPT. Está pensado para poder trabajar con diferentes fuentes alternativas de generación. También dispone de un sistema de seguridad que previene el funcionamiento en seco de la bomba.

El sistema cuenta con una línea de conducción subterránea que conecta el pozo con la pila de almacenamiento. A su vez la pila de almacenamiento se conecta a una línea de distribución domiciliaria. Cabe destacar la existencia de sistemas de micro medición de caudal instalados en todas las viviendas, a partir de los cuales se calculan las tarifas de los distintos consumidores.

La conmutación de las dos alternativas de generación se realiza de forma manual. Un responsable del CAPS, concretamente el fiscal, conecta el sistema de generación por la mañana si estima que el día será soleado. Cuando el recurso solar es inapropiado se conecta el sistema de respaldo durante varias horas para garantizar el suministro necesario.

Beneficiarios

El sistema de bombeo fotovoltaico de la comunidad de “El Limón” cuenta con 186 beneficiarios distribuidos en 56 domicilios. Según las últimas reuniones realizadas con los miembros del CAPS 6 domicilios han decidido desconectarse del sistema y explotar los pequeños pozos que tienen en sus tierras. A efectos de cálculo, estimaremos una densidad media de habitantes por domicilio para recalcular el número total de beneficiarios:

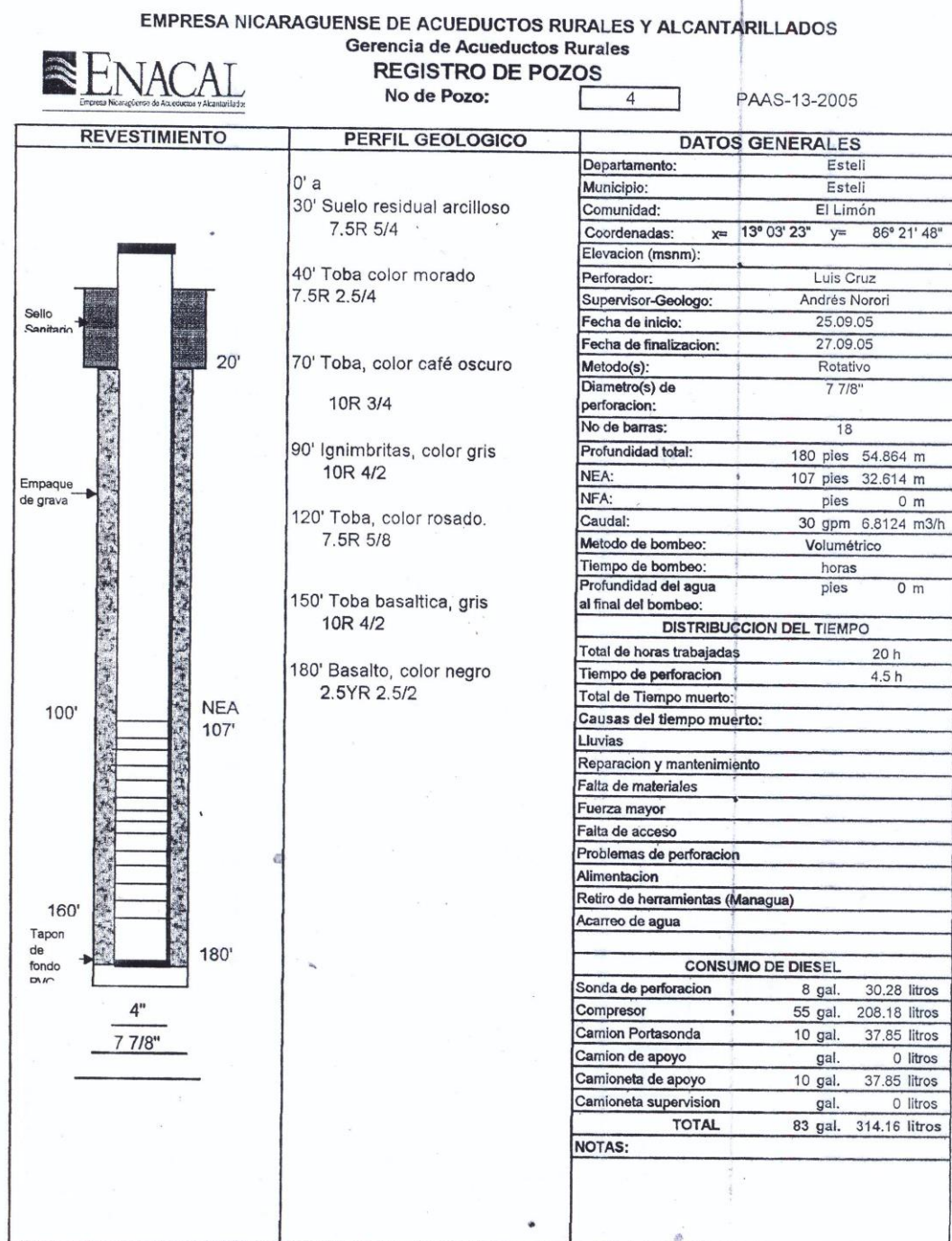
$$\rho_{población} = \frac{186 \text{ (personas)}}{56 \text{ (domicilios)}} = 3.32 \text{ (personas/domicilio)}$$

$$\text{Beneficiarios} = 50 - 6 \text{ (domicilios)} \cdot 3.32 \text{ (personas/domicilio)} = 146.14 \sim 147$$

3.2.2 Elementos del sistema

Pozo

La comunidad de "El Limón" cuenta con un pozo perforado, cuya obra se realizó entre el 25 y 27 de septiembre de 2005. El sondeo se encuentra protegido en el interior de una caseta, junto con los principales elementos de control del sistema. En el siguiente documento de ENACAL se adjunta el perfil del sondeo:



La profundidad de instalación de la bomba es de 30 m, lo que equivale a cinco tramos de camisa de 6 metros cada una.

$$h_{bomba} = 30 \text{ (m)}$$

Pila de almacenamiento

En la comunidad de “El Limón” existe una pila de almacenamiento situada en la parte alta de la comunidad. Se encuentra situada en las coordenadas: (13°03'41.9" N, 86°21'30.2" W). Esta pila fue construida entre los años 2005 y 2006 como parte del proyecto de implementación de un sistema de bombeo fotovoltaico.



Visita a la pila de “El Limón” durante el curso de SBFV realizado por la UC3M Fuente: Autor

Las dimensiones de la pila son 3 m. x 3 m. de base y 2.1 m. de altura y el espesor de sus paredes es de 15 cm. El volumen total de almacenamiento es, por tanto:

$$V_{pila}(m^3) = (3 - 2 \cdot 0.15)^2 \cdot 2.1 = 15.31 (m^3)$$

La entrada de agua está situada en la parte superior de la pila. Antes de entrar se hace circular una parte del fluido en paralelo a través de un sistema clorador para su tratamiento.

$$h_{vertido\ pila} = 2.1 (m)$$

La pila de almacenamiento se encuentra a 892 msnm. mientras que el pozo está a 864 msnm. la diferencia de alturas entre el pozo y la pila será:

$$h_{pozo-pila} = 28 (m)$$



Sistema de cloración instalado en la pila de almacenamiento

Fuente: Autor

Generador fotovoltaico

En la comunidad de “El Limón” el generador fotovoltaico está compuesto por un arreglo de 11 paneles en una estructura fija de soporte, la cual permite regular la inclinación en un grado de libertad mediante un sistema mecánico. Está rodeado por una valla protectora para evitar que alguna parte del sistema pueda ser manipulada o robada.



Sistema de generación fotovoltaica en la comunidad de “El Limón” (Estelí) Fuente: Autor

Los módulos fotovoltaicos instalados en esta comunidad son de la marca “BP Solar”, concretamente el modelo **BP380U**. Se trata de paneles fotovoltaicos de Silicio policristalino con 36 células por módulo. Cuentan con la certificación IEC 61215. A continuación, se adjuntan las especificaciones técnicas de los mismos:

- $P_{max} = 80 W_p$.
- $V_{pmax} = 17.6 V$.
- $V_{oc} = 22.1 V$.
- $I_{pmax} = 4.55 A$.
- $I_{sc} = 4.8 A$.
- $V_{max sistema} = 1000 V$. (IEC 61215)
- *Coeficientes de temperatura:*
 - $V = -(80 \pm 10) mV/^{\circ}C$
 - $I = +(0.065 \pm 0.015) \%/^{\circ}C$
 - $P = -(0.5 \pm 0.05) \%/^{\circ}C$
 - $NOTC = 47 \pm 2^{\circ}C$

*CEM ($1000 W/m^2$; $25^{\circ}C$)

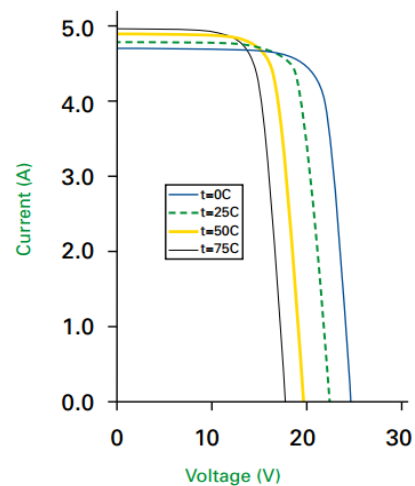


Figura 39 Curva característica del módulo BP380U

El arreglo está compuesto por dos ramas en paralelo, una de seis módulos y otra de cinco módulos. Es extraño que un generador FV presente un número impar de módulos, pero se nos explicó que había sido una decisión de diseño, no producto de ninguna otra causa. La potencia total instalada será:

$$P_p = n_{módulos} \cdot P_{max} = 11 \cdot 80 (W_p) = 880 (W_p)$$

Orientación de los módulos

A simple vista se puede observar que el generador fotovoltaico tiene inclinación en dos ejes perpendiculares entre sí. El eje móvil de la estructura no se instaló sobre el eje Norte – Sur, sino sobre el eje Este – Oeste. Los paneles presentan, por tanto, una orientación hacia el Oeste con una inclinación dada “ β_W ” así como una orientación hacia el Sur de inclinación “ β_S ”. Se desconoce el motivo de realizar la instalación del arreglo de paneles fotovoltaicos de dicha forma.



Sistema de generación fotovoltaica en la comunidad de “El Limón” (Estelí) Fuente: Autor

Mediante el uso de la brújula de un GPS, cartografía y la captura de imágenes y el posterior análisis de las mismas se han estimado las siguientes inclinaciones en ambas orientaciones:



$$\beta_W = 9^\circ$$



$$\beta_S = 10.3^\circ$$

Sistema de Respaldo

El sistema cuenta con una conexión alternativa al arreglo de paneles fotovoltaicos. A principios de 2015 se realizó la instalación de una conexión de respaldo a la red eléctrica comercial. La conexión se realiza de forma manual a través de un conmutador, como se puede apreciar en la imagen:



Conexión del sistema de respaldo instalado en la caseta del pozo de la comunidad de “El Limón” Fuente: Autor

Controlador

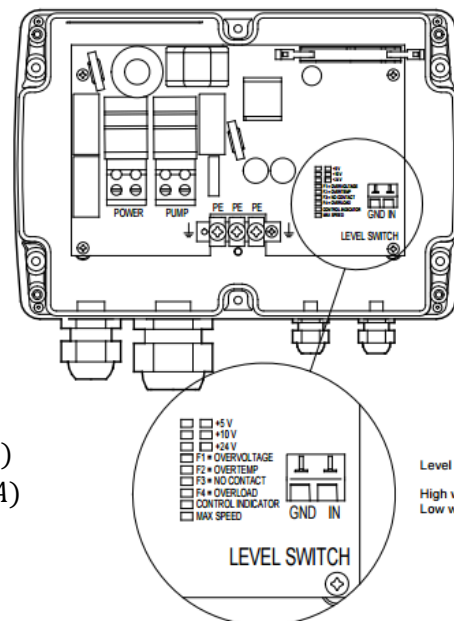
El sistema cuenta con un controlador de la marca “Grundfos”, concretamente el modelo “CU 200”. Este elemento se encuentra instalado en el soporte del arreglo fotovoltaico, dentro de una caja de protección debidamente protegido.

La unidad de control CU 200 es una unidad combinada de estado, control y comunicación especialmente desarrollada para el sistema “SQFlex”. La comunicación entre el controlador y la bomba tiene lugar a través del cable de suministro de potencia de la bomba. Esto se denomina sonido de señal principal (o Línea de Comunicación de Potencia) y hace que no se requieran cables adicionales entre la bomba y el elemento de control. Hace posible el arranque, parada o reinicio de la bomba pulsando el botón arranque/parada. Incorpora seguimiento MPPT y muestra potencia y errores en pantalla (funcionamiento en seco, sobrecarga, etc.). [29]



Controlador “Grundfos CU 200” instalado en “El Limón”

- Consumo de Potencia = 5 W.
- Tensión nominal AC = 90~240 V. (8.4 A)
- Tensión nominal DC = 30 ~300 V. (8.4 A)
- Carga máxima = 100 mA.
- Protección (IEC 34 – 5) = IP55
- Fusible de reserva = 10 A.



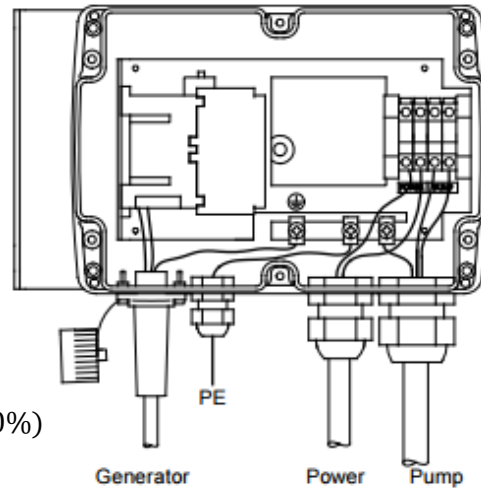
Level switch input
High water level: Contact is closed.
Low water level: Contact is open.

Caja de conexiones

En la caseta del pozo se encuentra una caja de conexiones de la marca “Grundfos” del modelo “Grundfos IO 101”. El “IO 101” habilita la conexión de un sistema de suministro de generación alternativo en caso de que la radiación solar sea insuficiente. El cambio entre los diferentes sistemas de generación debe hacerse manualmente. En caso de que el generador de respaldo se detenga manualmente, el IO 101 cambiará automáticamente al suministro de energía solar. Funciona como una caja de unión conectando todos los cables necesarios para la instalación. [29]



Caja de conexiones instalada en “El Limón” Fuente: Autor



- *Tensión nominal AC* = 230 V (−15%, +10%)
- *Tensión máxima AC* = 255 V (8.4 A)
- *Frecuencia de alimentación* = 50 Hz
- *Tensión máxima DC* = 255 V
- *Protección (IEC 34 – 5)* = IP55

Línea de conducción y distribución

La línea de conducción entre el pozo y la pila de almacenamiento se encuentra enterrada y es inaccesible. Según los datos aportados por la FAREM esta tiene una longitud de 480 metros.

$$L_{\text{pozo-pila}} = 480 \text{ m.}$$

Está compuesto por secciones de tubo de PVC de 1.5 pulgadas de diámetro, lo que equivale a:

$$\varnothing_{\text{tubería}} = 1.5 \text{ pulgadas} = 3.81 \text{ cm.}$$

La línea de distribución abastece a 56 hogares en toda la comunidad de “El Limón” pero no disponemos de datos de dicha instalación. No obstante, sólo nos interesa la línea de conducción del pozo a la pila, ya que la bomba no aporta presión al sistema de distribución

Bomba

El conjunto motor-bomba que encontramos en la comunidad de “El Limón” también pertenece a la familia “SQFlex” de la marca “Grundfos”. Se trata del modelo “11 SQF-2”, una bomba centrífuga con controlador integrado que permite trabajar en un amplio rango de voltajes tanto AC como DC.

- Tipo de motor = MSF3
- Potencia de entrada (P_1) = 1.4 kW
- Tensión nominal AC = 90~240 V
- Tensión nominal DC = 30~300 V
- Corriente nominal = 8.4 A
- Factor de potencia = 1.0
- Velocidad nominal = 500~3600 rpm
- Tipo de arranque = directo
- Grado de protección (IEC 34 – 5) = IP68
- Clase de aislamiento (IEC 85) = F

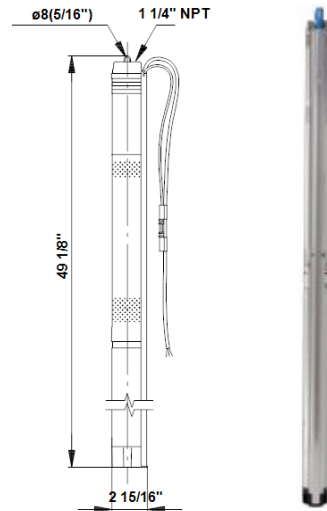


Figura 40 Bomba 11 SQF-2 [29]

Curva de rendimiento:

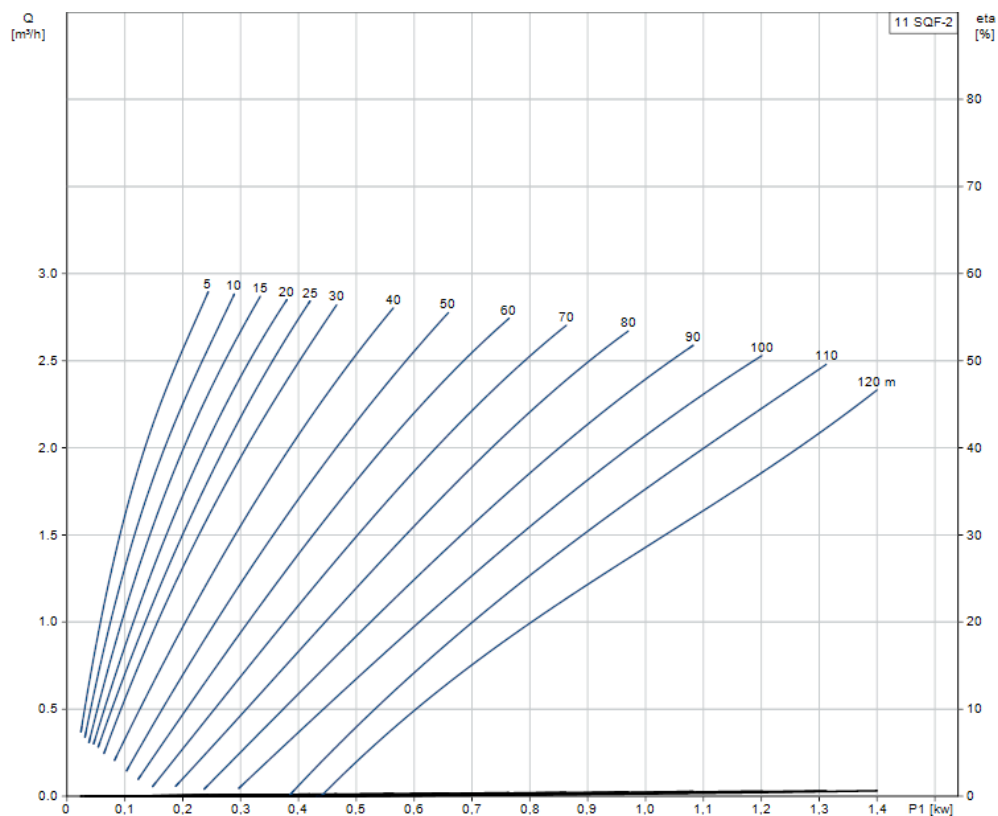


Figura 41 Curva de rendimiento de la bomba Grundfos 11 SQF-2. [29]

Financiación del proyecto

Proyecto realizado entre abril de 2006 y noviembre de 2007

Tabla 8 Financiación del Proyecto de “El Limón”

Fuentes de donación no reembolsable	
Familia y amigos de Hannah Curteis (Escocia e Inglaterra)	USD 10.000
Club de Rotarios (Toronto-Leaside, Canadá)	USD 10.000
Familia y amigos de Benjamin Rushwald (EEUU)	USD 8.000
Waterways (ONGD EEUU)	USD 3.000
Contraparte comunitaria	
Mano de obra donado	USD 1.200
Fondos recaudados en actividades comunitarias	USD 700
TOTAL	USD 32.900

Costes de operación del sistema

Al implementar un sistema de respaldo mediante conexión a red eléctrica se genera un coste de operación adicional, ya que el consumo de energía eléctrica de la red convencional ha de ser pagado por los miembros de la comunidad.

Según las leyes actuales de Nicaragua, la conformación de un CAPS permite a los usuarios acceder a una tarifa eléctrica reducida. No disponemos información acerca de esta, ni tampoco de lecturas de consumo eléctrico.

Para tener una estimación del coste mensual debido al consumo energético de la red convencional podemos tomar el dato del último pago realizado por la comunidad. Este asciende a un total de 1590 C\$ (55 USD aproximadamente).

Teniendo en cuenta un consumo medio mensual de 542.87 m^3 , el coste de operación estimado será:

$$\text{Coste por metro cúbico} = \frac{55 \text{ USD}}{542.87 \text{ m}^3} = 0.101 \text{ USD/m}^3$$

Datos de consumo

En el caso de estudio de la comunidad de “El Limón” se pudo acceder a los datos de consumo de la comunidad de un año completo. El SBFV cuenta con sistema de micro medición de caudal domiciliaria, a partir del cual se calculan las tarifas de consumo. Los datos manuscritos son recogidos por los miembros del CAPS y se encuentran manuscritos en un cuaderno.

Se pudo acceder a los volúmenes de consumo por domicilio entre julio de 2015 y julio de 2016. Debido a que los datos manuscritos se presentaban de forma confusa y a su posterior transcripción es posible que existan errores. Como forma de comprobación se estudió los consumos medios mensuales de cada domicilio para detectar anomalías

Como se comentó previamente existen 6 domicilios desconectados de la red. Esto se puede comprobar al examinar los datos de consumo nulo de esos domicilios. Los cálculos han sido realizados sobre un total de 50 domicilios.

Tabla 9 Consumo de agua en la comunidad de “El Limón”

	Consumo total	Consumo medio por domicilio
Anual	6514.4 m ³	130.29 m ³
Media mensual	542.87 m ³	10.86 m ³
Media diaria	18.1 m ³	0.36 m ³

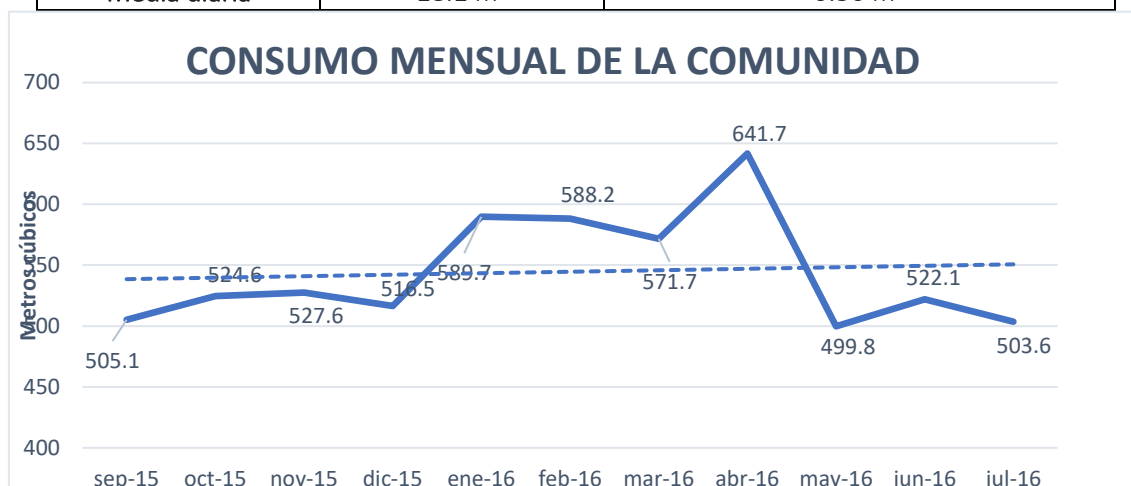


Figura 42 Consumo mensual de la comunidad de “El Limón”

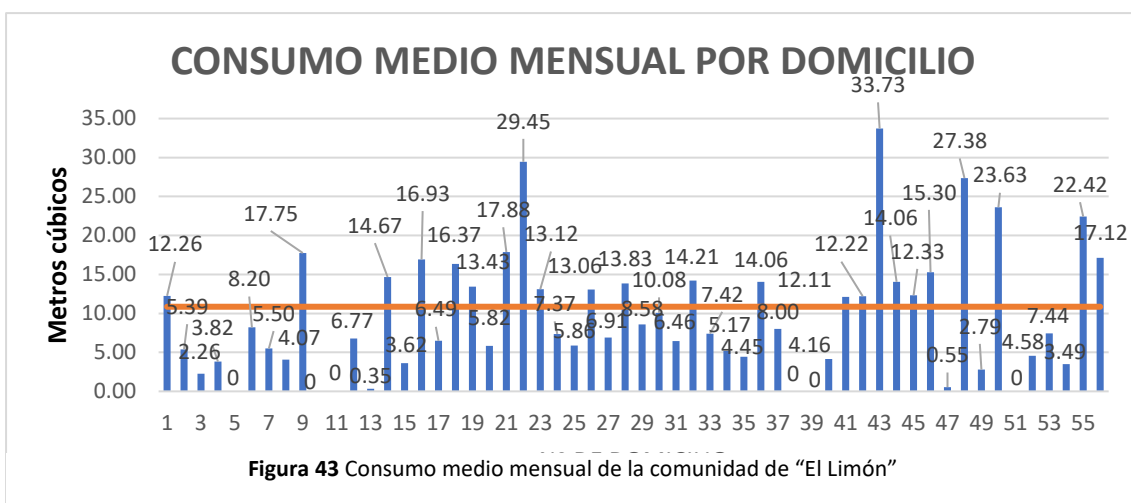


Figura 43 Consumo medio mensual de la comunidad de “El Limón”

3.2.3 Estudio teórico

En el siguiente estudio de carácter teórico se pretende calcular los parámetros de funcionamiento teóricos del sistema, el caudal que extraería en esas condiciones y la eficiencia del sistema. Estudiaremos el sistema como un SBFV de bombeo directo, es decir, sin la opción de generación de respaldo. Con esto se pretende estudiar el comportamiento del sistema sin respaldo para ver en qué medida se justifica la implantación de un sistema híbrido.

Teniendo en cuenta las características de los elementos definida previamente se emplearán los métodos de dimensionamiento de un sistema, con la particularidad de ejecutarse de forma inversa. Esto quiere decir que, a partir de los equipos instalados y el recurso solar disponible, se calcularán las necesidades hidráulicas que puede satisfacer el sistema.

Datos

- $Coordenadas = 13^{\circ}03'02.15\text{ N}, 86^{\circ}21'44.80\text{ W}$
- $Beneficiarios = 147$
- $h_{bomba} = 30\text{ m.}$
- $V_{pila} = 15.31\text{ m}^3.$
- $H_d = 28\text{ m.}$
- $L_{pozo-pila} = 480\text{ m.}$
- $\phi_{tuberia} = 3.81\text{ cm.}$
- $P_p = 880\text{ W.}$
- $P_{1\text{ MAX}} = 1.4\text{ kW.}$
- $\beta_W = 9^{\circ}$
- $\beta_S = 10.3^{\circ}$

Determinación del recurso solar

En primer lugar, se determinará el recurso solar disponible en cada mes del año. Es necesario recopilar los datos de radiación solar para compararlos con el modelo de consumo que se obtuvo a partir del sistema de micro medición. Con esto se pretende estimar el mes peor para estudiar el sistema en sus condiciones más críticas. Para ello se ha consultado la base de datos de la NASA obteniendo los siguientes valores:

Tabla 10 Irradiación solar media diaria y temperatura del aire. Fuente: [33]

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
$G_{dm}(0)$ (kWh/m ² d)	5.42	6.24	7.11	7.1	5.98	4.63	4.60	4.64	5.05	5.05	4.58	4.84
T_{aire} (°C)	25.4	25.1	25.8	27.5	28.4	28.5	27.9	27.8	27.4	27.2	27.4	26.7

Podemos observar como la época con el recurso solar disponible menor comprende de junio a diciembre. Consultando el gráfico de consumo previamente expuesto podemos observar dos valores máximos: abril y diciembre. Noviembre es el mes con menor recurso, pero también tiene uno de los menores consumos. Abril, pese a tener el mayor consumo, también tiene la mayor disponibilidad de recurso solar. El mes peor, por tanto, será diciembre.

Una vez identificado el mes peor podemos calcular la radiación solar media en las condiciones de la instalación ($\beta_W = 9^\circ$; $\beta_S = 10.3^\circ$). Para el mes de diciembre y en las coordenadas referidas podemos extraer los siguientes datos:

- $G_{dm}(0)$ (diciembre) = 4.84 kWh/m²día.
- $\beta_{opt} = 41^\circ$
- $G_{dm}(0^\circ, \beta_{opt}) = 5.98$ kWh/m²día. (Base de datos de la NASA [33])

A partir de las ecuaciones previamente definidas en el apartado de dimensionamiento se puede calcular la radiación solar media diaria. Dado que no se pudo realizar un estudio adecuado del emplazamiento del generador fotovoltaico se realizarán los cálculos con un factor de sombreado estimado $F_s = 0.8$.

Al estar orientado el generador tanto al Sur como al Oeste calcularemos el factor F_i para una orientación Sur pura y $\beta_S = 10.3^\circ$ y, en un segundo caso con orientación Oeste e inclinación $\beta_W = 9^\circ$. Para el segundo caso modelizamos el estudio como $\alpha = 90^\circ$ y $\beta = 9^\circ$. Emplearemos la media de ambos valores.

$$F_s = 0.8$$

$$K = \frac{G_{dm}(0^\circ, \beta_{opt})}{G_{dm}(0)} = \frac{5.98}{4.84} = 1.24$$

- $F_{i(Sur)} = 1 - (1.2 \cdot 10^{-4}(\beta - \beta_{opt})^2) = 1 - (1.2 \cdot 10^{-4}(10.3 - 41)^2) = 0.89$
- $F_{i(Oeste)} = 1 - (1.2 \cdot 10^{-4}(\beta - \beta_{opt})^2 + 3.5 \cdot 10^{-5}\alpha^2) =$
 $= 1 - (1.2 \cdot 10^{-4}(9 - 41)^2 + 3.5 \cdot 10^{-5}90^2) = 0.594$

$$F_i = \frac{F_{i(Sur)} + F_{i(Oeste)}}{2} = 0.74$$

$$G_{dm}(\alpha, \beta) = G_{dm}(0) \cdot F_i \cdot F_s \cdot K = 4.84 \cdot 0.74 \cdot 0.8 \cdot 1.24 = 3.55 \text{ kWh/m}^2\text{día}$$

Con la radiación solar media diaria determinada y conociendo la potencia total instalada es posible calcular la energía de bombeo teórica del sistema. Para ello se emplea el área equivalente de paneles y el rendimiento del generador fotovoltaico.

Al tratarse de un sistema con seguidor MPPT incorporado emplearemos un factor de acoplo:

$$F_m = 0.95$$

Para calcular la temperatura media de célula tomaremos la temperatura media del aire en diciembre de la base de datos ($T_a = 26.7^\circ\text{C}$), la temperatura de operación nominal de la célula ($T_{ONC} = 47^\circ\text{C}$) y las condiciones más desfavorables de irradiancia ($\lambda = 1000 \text{ W/m}^2$)

$$T_m = T_a + \lambda \cdot \frac{T_{ONC} - 20}{800} = 26.7 + 1000 \cdot \frac{47 - 20}{800} = 60.45^\circ\text{C}$$

El generador fotovoltaico está compuesto por módulos de silicio policristalino. Como podemos observar en su hoja de características la variación de la potencia con la temperatura es $\delta = 0.005$. El rendimiento del generador es, por tanto:

$$\eta_{fv} = F_m(1 - \delta(T_m - 25))\eta_{CEM} = 0.95(1 - 0.005(60.45 - 25))\eta_{CEM} = 0.78 \eta_{CEM}$$

El área equivalente de paneles lo podemos relacionar tanto con la energía de bombeo como con la potencia instalada del generador fotovoltaico:

$$A_{\text{paneles}} = \frac{E_B}{G_{\text{dm}}(\alpha, \beta) \eta_{\text{fv}}}$$

$$P_p = A_{\text{paneles}} \cdot \lambda_{\text{CEM}} \cdot \eta_{\text{CEM}} = \frac{E_B \cdot \lambda_{\text{CEM}} \cdot \eta_{\text{CEM}}}{G_{\text{dm}}(\alpha, \beta) \eta_{\text{fv}}} = 0.88 \text{ kW}_p$$

$$E_B = \frac{0.88 \text{ (kW}_p) G_{\text{dm}}(\alpha, \beta) \eta_{\text{fv}}}{\lambda_{\text{CEM}} \cdot \eta_{\text{CEM}}} = \frac{0.88 \text{ (kW}_p) \cdot 3.55 \text{ (kWh/m}^2\text{día)} \cdot 0.78 \cdot \eta_{\text{CEM}}}{1 \text{ (kW/m}^2) \cdot \eta_{\text{CEM}}} =$$

$$= 2.44 \text{ (kWh/día)}$$

Conociendo la energía de bombeo que provee el sistema podemos seguir avanzando en su estudio con el objetivo de calcular el caudal teórico en las condiciones de funcionamiento estudiadas. En primer lugar, hemos de determinar la altura total equivalente del sistema

$$E_B = \frac{E_H}{\eta_B} = \frac{\rho g Q_d H_{te}}{3600 \eta_B} = 2.44 \text{ (kWh/día)}$$

$$H_{te} = H_d + H_{st} + (H_{dt} - H_{st}) \left(\frac{Q_d}{Q_t} \right) + H_p$$

Para los niveles estático y dinámico emplearemos los datos obtenidos en un sondeo en campo realizado en octubre de 2016 durante una de las sesiones de trabajo de campo:

- $H_{st} = 24.2 \text{ m.}$
- $H_{dt} = 26.6 \text{ m.}$
- $Q_t = 1.45 \text{ m}^3/\text{h} = 1.45 \cdot \text{HSP (m}^3/\text{día)}$
- $H_d = 28 \text{ m.}$ (medido con GPS)

$$H_{te} = 28 + 24.2 + (26.6 - 24.2) \cdot \left(\frac{Q_d}{1.45 \cdot \text{HSP}} \right) + H_p = 52.2 + \frac{1.65}{\text{HSP}} \cdot Q_d + H_p$$

Para calcular la altura equivalente por pérdidas del sistema debemos realizar varias suposiciones, ya que no disponemos de los datos necesarios. Se desconocen los accesorios instalados, por lo que las pérdidas locales se estimarán a partir de las distribuidas.

Conocemos los datos de la línea de conducción que va del pozo a la pila, el material empleado es el mismo tubería de PVC de 3.81 cm de diámetro. La longitud de la línea de conducción es la siguiente:

$$L_{\text{pozo-pila}} = 480 \text{ m.}$$

Para calcular las pérdidas distribuidas nos encontramos con un primer problema, ya que desconocemos la velocidad media de circulación del fluido al depender esta del caudal.

$$H_{pd} = f \cdot \frac{L v^2}{d 2g}$$

Podemos relacionar la velocidad de circulación del fluido y el caudal a partir del área la tubería, siendo esta de sección circular y $\phi_{tuberia} = 3.81 \text{ cm}$. Nótese que en este caso estamos trabajando en unidades del SI, por lo que el caudal lo medimos en m^3/s . No debe confundirse con el caudal diario " Q_d " (medido en m^3/h) que estamos tratando de calcular.

$$Q(m^3/s) = v(m/s) \cdot A(m^2); v(m/s) = \frac{Q(m^3/s)}{A(m^2)}$$

$$H_{pd} = f \cdot \frac{Lv(\frac{Q}{A})^2}{d2g}$$

Para emplear el diagrama de Moody necesitamos determinar un número de Reynolds. Como no conocemos la velocidad del fluido lo calcularemos a partir de los datos reales de bombeo medidos en campo. Con el sistema de bombeo conectado a la red eléctrica consideramos que la bomba estaría trabajando en condiciones de ofrecer el máximo caudal. Se registró un caudal:

$$Q = 1.45 \text{ (m}^3/\text{h)} = 1.45 \text{ (m}^3/\text{h)} \cdot \frac{(h)}{3600 \text{ (s)}} = 4.03 \cdot 10^{-4} \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$\text{Agua a } 25^\circ\text{C } \mu = 0.890 \cdot 10^{-3} \text{ (N} \cdot \text{s/m}^2\text{); } \rho = 997 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$A_{tuberia} = \frac{\pi(\phi_{tuberia})^2}{4} = \frac{\pi(3.81 \cdot 10^{-2})^2}{4} = 1.14 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.$$

$$Re = \frac{\rho(\frac{Q}{A})d}{\mu} = \frac{997 \cdot \left(\frac{4.03 \cdot 10^{-4}}{1.14 \cdot 10^{-3}}\right) \cdot 3.81 \cdot 10^{-2}}{0.890 \cdot 10^{-3}} = 1.5 \cdot 10^4 \text{ (turbulento)}$$

La rugosidad del PVC es $\varepsilon = 0.0015 \text{ mm}$. La rugosidad relativa es el cociente entre esta y el diámetro.

$$\frac{\varepsilon}{\phi_{tuberia}} = \frac{1.5 \cdot 10^{-6}}{3.81 \cdot 10^{-2}} = 3.94 \cdot 10^{-5}$$

A partir de estos datos de entrada podemos determinar el coeficiente de fricción mediante el método gráfico del diagrama de Moody como se puede observar en la siguiente página:

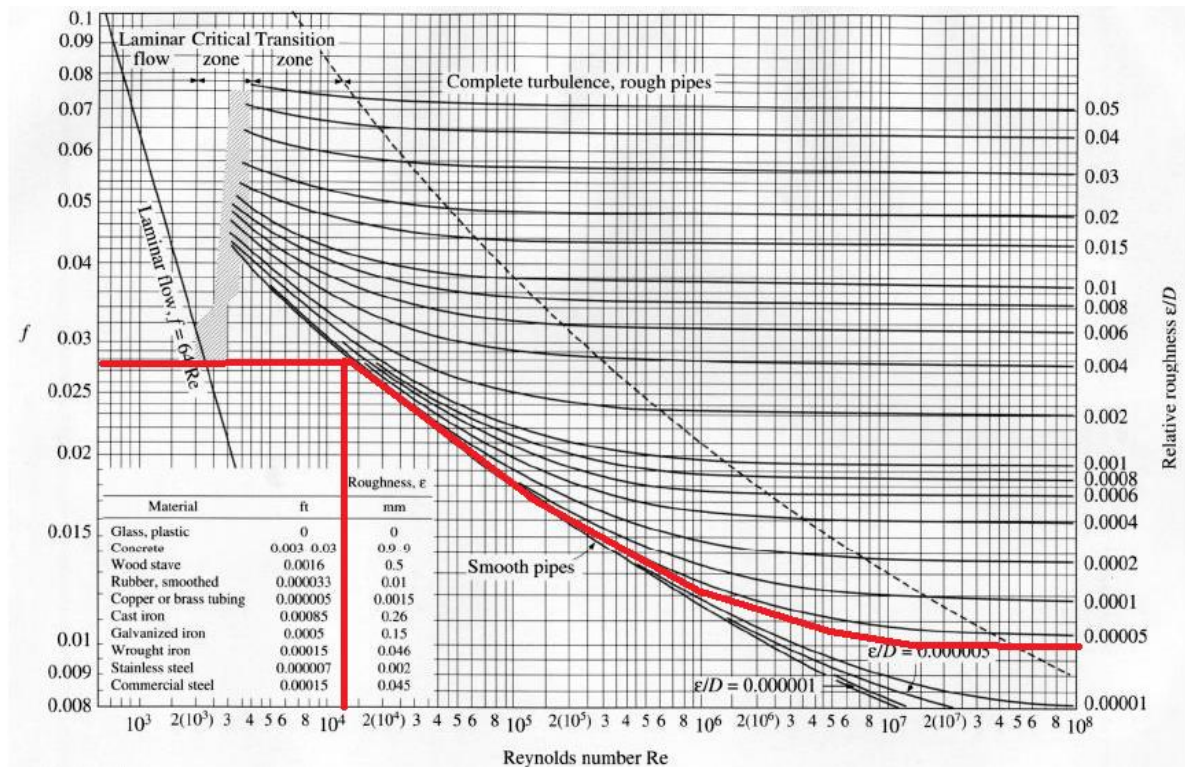


Figura 44 Diagrama de Moody

$$f = 0.028$$

Conocido el factor de fricción ya podemos calcular las pérdidas distribuidas en función del caudal, pero nos interesa expresarlo en unidades de m^3/h . No debe confundirse con el caudal diario " Q_d " (medido en $m^3/día$), que estamos tratando de calcular, ni el caudal pico " Q_p " (medido en m^3/h).

$$Q(m^3/s) = v(m/s) \cdot A(m^2); v(m/s) = \frac{Q(m^3/s)}{A(m^2)}$$

$$A_{tubería} = \frac{\pi(\phi_{tubería})^2}{4} = \frac{\pi(3.81 \cdot 10^{-2})^2}{4} = 1.14 \cdot 10^{-3} m^2.$$

Hay que tener en cuenta, cuando trabajamos con sistemas de generación fotovoltaicos, que la duración de un día no son las habituales 24 horas, sino las horas solares pico. Las Horas Solares Pico (HSP) son el número de horas de irradiancia en condiciones estándar de medida que equivalen a la radiación solar diaria.

$$HSP(h/día) = \frac{G_{dm}(\alpha, \beta) \left(\frac{Wh}{m^2 día} \right)}{1000 (W/m^2)} = \frac{3550 \left(\frac{Wh}{m^2 día} \right)}{1000 (W/m^2)} = 3.55 (h/día)$$

$$Q_p(m^3/h) = \frac{Q_d(m^3/día)}{HSP(h/día)} = \frac{Q_d}{3.55} (m^3/h)$$

$$Q(m^3/s) = Q_p(m^3/h) \cdot \frac{60 \cdot 60 (s)}{(h)} = \frac{Q_d}{3.55} (m^3/h) \cdot \frac{(h)}{60 \cdot 60 (s)} = \frac{Q_d}{12780} (m^3/s)$$

Por lo tanto, la ecuación de pérdidas en función del caudal diario resulta:

$$H_{pd} = f \cdot \frac{L \left(\frac{Q}{A} \right)^2}{d \cdot 2g} = 0.028 \cdot \frac{480 \cdot \left(\frac{Q_d (m^3/s)}{(12780 \cdot (1.14 \cdot 10^{-3}))} \right)^2}{3.81 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 9.81} = 0.085 \cdot Q_d^2$$

Como se explicó anteriormente no existe información para calcular las pérdidas locales, por lo que se estimarán como un 10 % de las pérdidas distribuidas. Podemos expresar entonces la altura equivalente total por pérdidas como:

$$H_p = H_{pd} + H_{pl} = 1.1 \cdot H_{pd} = 1.1 \cdot 0.085 \cdot Q_d^2$$

$$H_p = 0.093 \cdot Q_d^2$$

Una vez expresadas la altura equivalente a pérdidas en función del caudal diario " Q_d " podemos expresar la altura total equivalente de la misma manera:

$$H_{te} = 52.2 + \frac{1.65}{HSP} \cdot Q_d + H_p = 52.2 + 0.465 \cdot Q_d + 0.093 \cdot Q_d^2$$

Volviendo a la ecuación general de bombeo:

$$E_B = \frac{E_H}{\eta_B} = \frac{\rho g Q_d H_{te}}{3600 \eta_B} = 2.44 \text{ (kWh/día)}$$

$$Q_d H_{te} = \frac{3600 \cdot \eta_B \cdot 2440 \text{ (Wh/día)}}{997 \cdot 9.81} = 898 \cdot \eta_B$$

$$= 52.2 \cdot Q_d + 0.465 \cdot Q_d^2 + 0.093 \cdot Q_d^3 = 898 \cdot \eta_B$$

Suponemos un valor de rendimiento de la bomba $\eta_B = 0.4$. Resolviendo la ecuación:

$$Q_d = 8.55 \text{ m}^3/\text{día}$$

A partir de este valor de caudal medio diario podemos calcular el caudal pico y la altura equivalente en pérdidas, de abatimiento y total:

$$Q_p = \frac{Q_d}{HSP} = \frac{8.55}{3.55} = 2.41 \text{ m}^3/h.$$

$$H_p = 0.093 \cdot Q_d^2 = 0.093 \cdot 8.55^2 = 6.8 \text{ m.}$$

$$H_{abatimiento} = 0.465 \cdot Q_d = 0.465 \cdot 8.55 = 3.97 \text{ m.}$$

$$H_{te} = H_{est} + H_{abatimiento} + H_p = 52.2 + 3.97 + 6.8 = 68.34 \text{ m.}$$

3.2.4 Análisis experimental

Durante las diversas jornadas de trabajo de campo se realizaron diferentes actividades en la comunidad de cara al estudio del sistema, tal y como se explicó al inicio. En primer lugar, se contactó con la comunidad y se les comunicó la naturaleza de las actividades a realizar, con las que estuvieron de acuerdo.

Tras la aceptación de la comunidad se identificaron los equipos instalados y la configuración del sistema. Es primordial realizar esta fase primero, si es posible, ya que permite una comprensión mayor del sistema de cara a plantear su estudio. Todos estos datos han sido expuestos previamente.

Cabe destacar que no siempre se pudo disponer de todos los instrumentos de medición, lo que obligó a planificar y adaptar las sesiones de campo en función de ello. Debido a que gran parte del trabajo se realizó durante la temporada de lluvias se cancelaron múltiples sesiones de trabajo de campo. En varias ocasiones se accedió a la comunidad, pero no se pudo emplear los instrumentos de medición debido a la lluvia.

Otro factor importante fue la disponibilidad de los miembros del CAPS, ya que al dedicarse a su actividad agrícola no siempre se encontraban accesibles. Todas las actividades se realizaron en compañía de un miembro del CAPS al que se le explicaba todo el proceso y se mostraba los datos recopilados. El fiscal del CAPS fue, en el caso de la comunidad de “El Limón”, el más implicado en el estudio y mostró un gran interés y cooperación.

A continuación, se expondrán una a una las diferentes actividades de recogida de datos para el estudio, describiendo en primer lugar cómo y con que equipo se realizaron:

Medida de caudal con el sistema conectado a red

Como hemos comentado anteriormente el SBFV de “El Limón” es un sistema híbrido que puede trabajar conectado a la red eléctrica. En primer lugar, se realizaron diversas mediciones del caudal extraído con el sistema conectado a generación de respaldo.

Para medir el caudal que extrae la bomba cuando se encuentra conectado a la red eléctrica se tomaron varios videos de las lecturas del caudalímetro instalado a la salida del pozo. Se emplearon teléfonos móviles para grabar y cronometrar las mediciones, que se realizaron durante cuatro visitas a la comunidad.

Tras examinar las grabaciones y comparar los datos vemos que varían entre $1.44 \text{ m}^3/\text{h}$ y $1.47 \text{ m}^3/\text{h}$, error debido al factor humano al realizar las grabaciones. Con conexión a red consideraremos un caudal aproximado de $Q_{red} = 1.45 \text{ m}^3/\text{h}$



Caudalímetro del pozo de “El Limón”

Fuente: Autor

Medida de caudal con el sistema conectado a generador fotovoltaico

Para obtener una primera idea del funcionamiento real del SBFV es necesario determinar el caudal extraído cuando está conectado al generador fotovoltaico. Como ya sabemos, la potencia entregada a la bomba variará con la radiación y esta, dada la localización geográfica y el clima del lugar, no suele mantenerse constante mucho tiempo.

En un primer lugar no se disponía del software ni del cableado para emplear el sistema de datalogging del solarímetro (de marca PCE – IBERICA, modelo PCE-SPM1), lo que dificultaba el trabajo. Para recopilar los datos de la forma más precisa posible, dado los medios disponibles, se optó por realizar grabaciones de video sincronizadas del caudalímetro y el solarímetro, en forma de rudimentario sistema de datalogging.

Estos datos no son muy exactos, pues la variabilidad de la irradiancia obligaba a tomar pequeñas muestras de tiempo para evaluar el caudal, con el error que esto supone. Al tomar pequeñas muestras se aproxima un valor medio de irradiancia para dichos valores. La lectura del caudalímetro también es más inexacta, ya que se mide poco volumen de agua con una resolución de la medida de tiempo de un segundo.

Se escogió un día relativamente despejado y soleado para tratar de medir con una irradiancia lo más estable posible. Se tomó una muestra de grabación de 10 minutos, durante los cuales la entrada de nubes provocó la parada de la bomba. No obstante, los tramos de irradiancia fuerte fueron relativamente largos y estables. Se observó que la bomba se detenía cuando el valor de la irradiancia descendía entre los 400 W/m^2 y los 500 W/m^2 . A continuación, se exponen los datos obtenidos para diferentes valores de irradiancia.

Tabla 11 Irradiancia vs caudal

λ	Q_{FV}
850 W/m^2	$1.08 \text{ m}^3/\text{h}$
900 W/m^2	$1.15 \text{ m}^3/\text{h}$
950 W/m^2	$1.20 \text{ m}^3/\text{h}$

Durante el tiempo medido el porcentaje de tiempo de bombeo fue del 53% y el caudal medio de $1.12 \text{ m}^3/\text{h}$.

Para observar gráficamente la variación de la irradiancia con la entrada de la nube podemos observar la siguiente gráfica, realizada a partir de los datos obtenidos posteriormente con el sistema de datalogging del solarímetro:

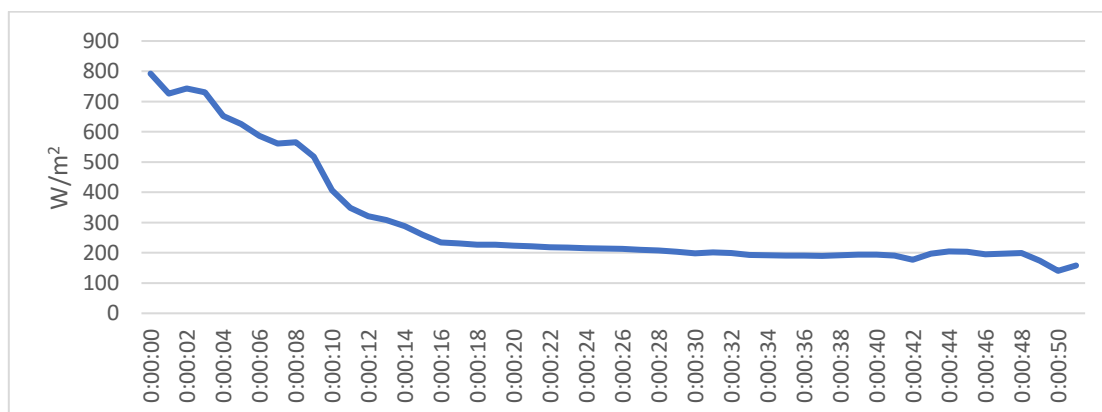


Figura 45 Muestra de irradiancia

Una vez se pudo emplear el sistema de datalogging del solarímetro se procedió a la recolección automática de datos sincronizados de irradiancia y caudal, esta vez con una precisión mucho mayor. Se intentó evaluar los datos en situaciones de irradiancia más o menos constante. Como hemos visto anteriormente esto es complicado debido al clima de la zona y la estación actual, ya que la nubosidad es muy variable. A continuación, podemos observar un ejemplo:

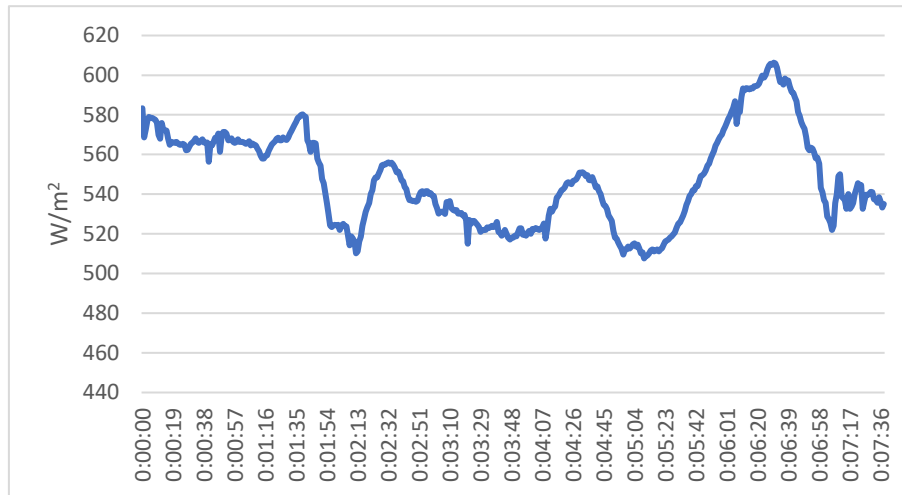


Figura 46 Muestra de irradiancia

Se tomaron diferentes muestras en distintas condiciones de funcionamiento para tratar de obtener una relación entre la irradiancia recibida en el generador fotovoltaico y el caudal extraído por la bomba. Se emplearán para este estudio tres casos: funcionamiento límite, irradiancia media e irradiancia alta.

Funcionamiento límite

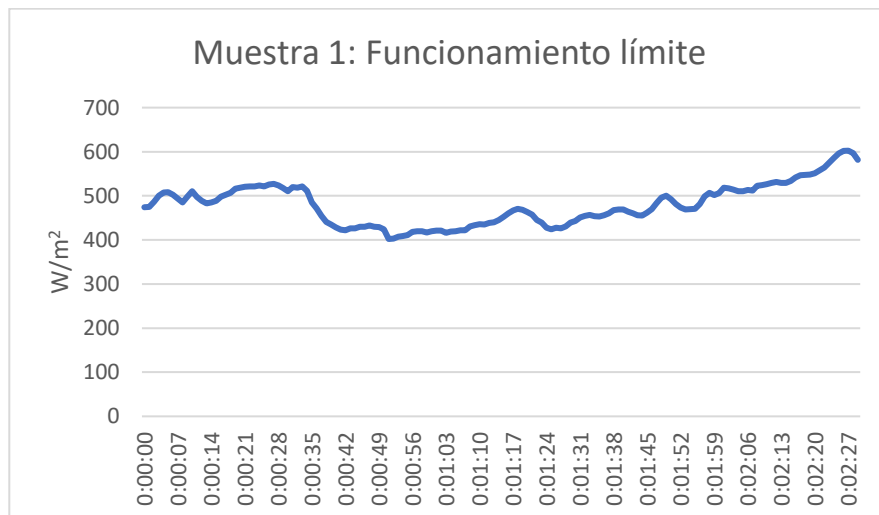


Figura 47 Muestra 1 de irradiancia

Este es el caso límite de funcionamiento de la bomba. Como hemos podido comprobar experimentalmente la bomba se para cuando la irradiancia baja de los 420 W/m^2 , valor que se asemeja a la estimación inicial. Durante esta muestra la bomba se detuvo dos veces.

- $\lambda_{media} = 480 \text{ W/m}^2$
- $Q_{FV} = 0.52 \text{ m}^3/\text{h}$

Irradiancia media

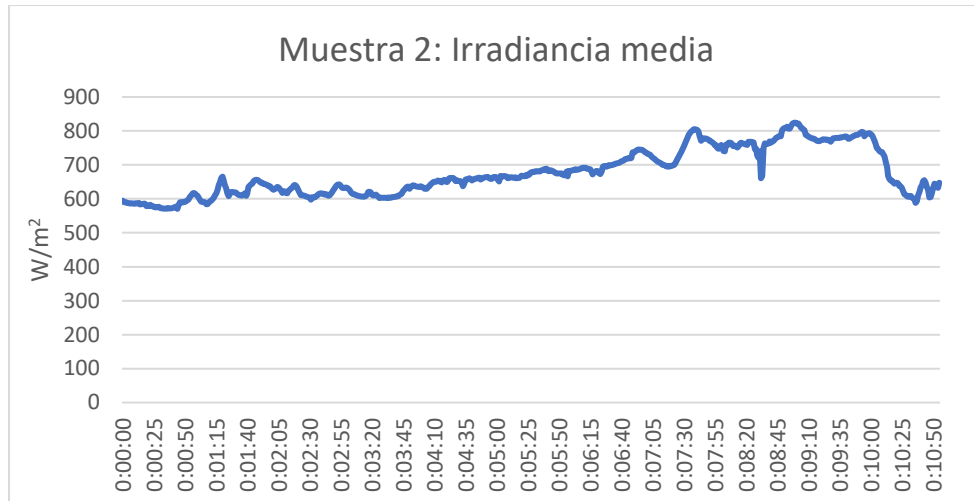


Figura 48 Muestra 2 de irradiancia

En el rango de irradiancias medias se consiguió una muestra relativamente estable en diferentes rangos entre los 600 W/m^2 y los 800 W/m^2 .

Para realizar el análisis de la relación entre irradiancia y caudal se han tomado las lecturas de tiempos del caudalímetro cada vez que este medía 10 litros. Se ha dividido el análisis en 13 muestras diferentes y calculado caudal e irradiancia media en cada uno de ellos. La última muestra recoge la última lectura de 4 litros. Los datos obtenidos de cada muestra son los siguiente:

Tabla 12 Irradiancia vs caudal

<i>Muestra</i>	<i>Tiempo (s)</i>	$Q_{FV}(\text{m}^3/\text{h})$	$\lambda_{media}(\text{W}/\text{m}^2)$
1	72	0.50	588
2	55	0.65	632
3	58	0.62	620
4	59	0.61	619
5	52	0.69	656
6	44	0.82	671
7	49	0.73	684
8	42	0.86	721
9	39	0.92	755
10	39	0.92	751
11	35	1.03	791
12	37	0.97	778
13	42	0.86	728
14	28	0.51	622

Durante la muestra completa se obtuvieron los siguientes datos medios:

- $\lambda_{media} = 676 \text{ W/m}^2$
- $Q_{FV} = 0.76 \text{ m}^3/\text{h}$

Irradiancia alta

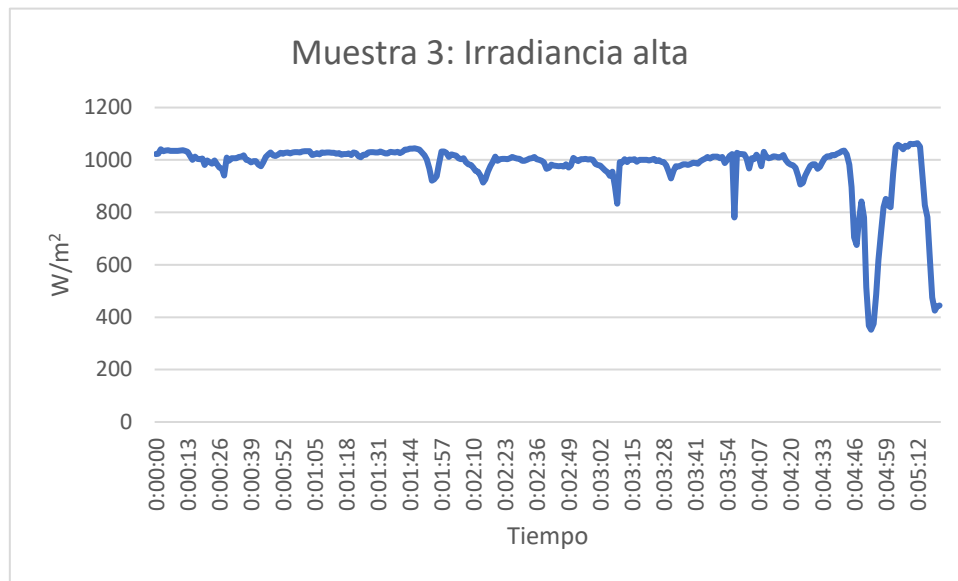


Figura 49 Muestra 3 de irradiancia

Uno de los días más solados y despejados se accedió a la comunidad en las horas de máxima radiación solar, con objeto de evaluar el funcionamiento del sistema en condiciones casi ideales. Se registró una muestra estable en torno a los 1000 W/m^2 (condiciones estándar de medida). No obstante, la entrada de una pequeña nube hizo que la bomba se parara al bajar la irradiancia por debajo de los 400 W/m^2 . Para hacer una estimación adecuada se eliminaron los datos a partir de dicha caída de la irradiancia, en el minuto "04:35", para estudiar el comportamiento estable del sistema.

- $\lambda_{media} = 1000 \text{ W/m}^2$
- $Q_{FV} = 1.18 \text{ m}^3/h$

En este caso se puede observar claramente el efecto de la entrada de una nube, pues en apenas 30 segundos provoca una parada del sistema. Si calculamos la irradiancia media del sistema, incluyendo el tramo afectado por la nube que provoca el apagado de la bomba, podemos observar como reduce el valor medio de ambos parámetros:

- $\lambda_{media} = 976 \text{ W/m}^2$
- $Q_{FV} = 1.04 \text{ m}^3/h$

Correlación experimental Caudal vs Irradiancia

A partir de los datos recopilados en diferentes muestras se procedió a elaborar una gráfica que mostrara la relación entre los valores de irradiancia y caudal. En la siguiente gráfica se recoge la relación entre los diferentes valores experimentales recogidos.

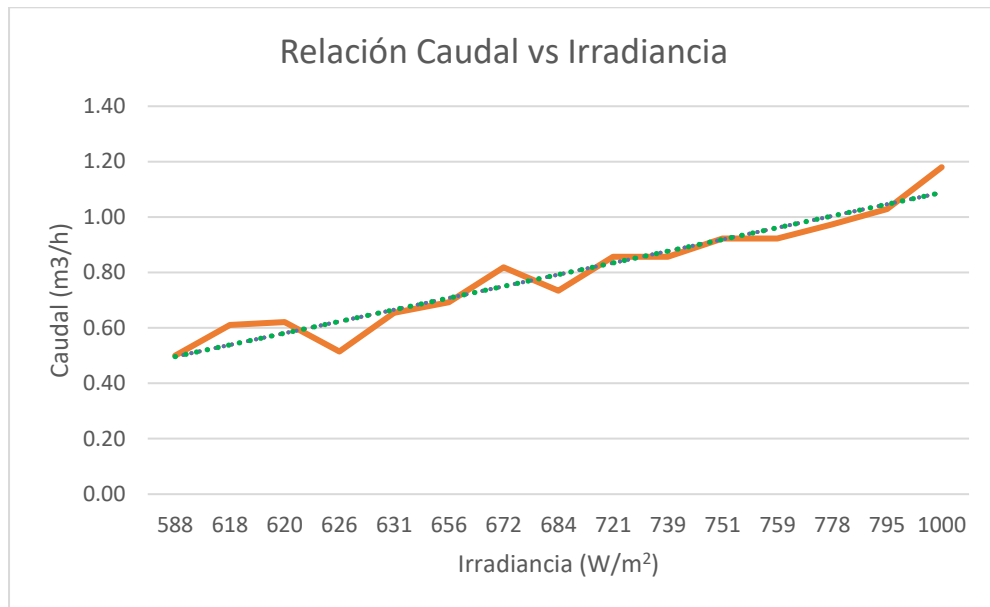


Figura 50 Relación caudal vs irradiancia

Se ha realizado una aproximación lineal definida por la siguiente ecuación:

$$Q_{FV} = 0.0018 \cdot \lambda - 0.4642$$

Potencia experimental

El controlador *Grundfos CU 200* posee una pantalla donde indica la potencia entregada a la bomba. Se tomaron medidas sincronizadas de potencia e irradiancia con la que se construyó la siguiente gráfica:

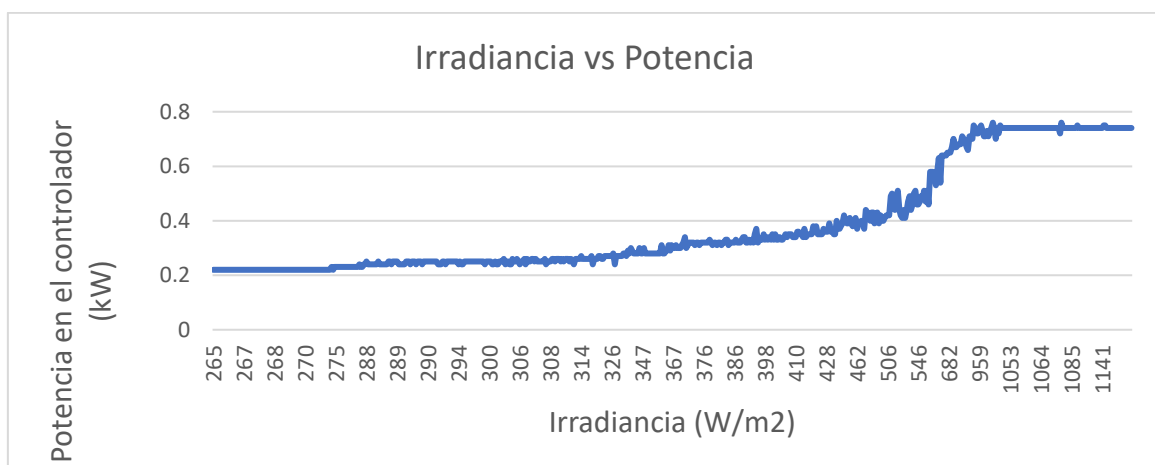


Figura 51 Irradiancia vs potencia

Podemos observar un valor asintótico en la potencia $P_1 = 0.74 \text{ kW}$ incluso para valores tan elevados de irradiancia como $\lambda = 1171 \text{ W/m}^2$

Sondeo

Durante unas semanas se realizaron mediciones de niveles de agua en el pozo de abastecimiento del sistema al contar con un equipo de sondeo prestado. En conversaciones con miembros del CAPS se compartió información de sondeos realizados anteriormente tanto por miembros de la FAREM-Estelí como de otras entidades.

Gracias a esto podemos disponer de datos relativamente fiables de los niveles estático y dinámico y calcular el abatimiento del pozo. Los datos obtenidos por sondeo son los siguientes:

Tabla 13 Niveles estático y dinámico

Fecha	2005	marzo - 2015	octubre - 2016
Nivel estático	17 m.	23.1 m.	24.2 m.
Nivel dinámico	20 m.	24.3 m.	26.6 m.



Sondeo realizado en el pozo de la comunidad de “El Limón” Fuente: Autor

Nivel de llenado de la pila de almacenamiento

En las primeras visitas a la pila de almacenamiento se detectó que el ruido producido por el vertido de agua en la parte superior de la pila era elevado. Esto sólo podía deberse al bajo nivel de la pila de almacenamiento, por lo que se decidió abrirla y medir el nivel del agua.

Esta medida se realizó a las 12:00 AM, hora a la cual se ha consumido gran parte de la reserva en el desayuno y aseo de la mañana. Se suponía encontrar un nivel reducido, pero no tanto como se observó.

La columna de agua medida tenía una altura de 16.25 cm. Dada la geometría de la pila y realizando los cálculos pertinentes obtenemos el volumen de llenado del depósito:

$$V_{\text{deposito}} = (3 - 2 \cdot 0.15)^2 \cdot 16.25 \cdot 10^{-2} = 1.18 \text{ m}^3$$

3.2.5 Presentación de resultados

A partir de los datos calculados previamente, tanto de forma teórica como determinados experimentalmente, se procederá a la evaluación y comparación de los mismos. Se pretende determinar el funcionamiento teórico del sistema y compararlo con su funcionamiento en condiciones reales.

Estudio teórico

En primer lugar, evaluaremos el comportamiento del modelo teórico del sistema, del cual destacaremos los siguientes datos:

- $G_{dm}(\alpha, \beta) = 3.55 \text{ kWh/m}^2\text{día}$
- $E_B = 2.44 \text{ kWh/día}$
- $HSP = 3.55 \text{ h/día}$
- $Q_d = 8.55 \text{ m}^3/\text{día}$
- $Q_p = 2.41 \text{ m}^3/\text{h}$.
- $H_p = 6.8 \text{ m}$.
- $H_{estática} = 56.17 \text{ m}$.
- $P_p = 880 \text{ W}$.

Podemos realizar una primera comprobación de la altura equivalente en pérdidas, para confirmar que se encuentra en un rango normal para este tipo de sistemas. Por lo general en sistemas de bombeo fotovoltaico la altura equivalente en pérdidas ronda el 10% de la altura estática. En el caso de este estudio podemos comprobar que se aproxima:

$$\frac{H_p}{H_{estática}} = \frac{6.8}{56.17} = 12.1 \%$$

Esto confirma las aproximaciones realizadas a la hora del cálculo de la misma y, por tanto de una parte importante de las pérdidas de rendimiento del sistema.

Un factor clave del funcionamiento de este sistema es la orientación de los paneles. Como se pudo comprobar, la doble inclinación de los mismos afecta negativamente al rendimiento del sistema. Se desconocen las causas de esta decisión de diseño y no se descarta que obedezcan a alguna condición particular del entorno. El efecto en el rendimiento del sistema se mide en el factor de irradiación y su efecto es el siguiente:

Para una orientación Sur pura tenemos un factor de irradiación mayor que para la combinación de inclinaciones Sur y Oeste. El decremento de rendimiento en el sistema es:

$$\text{Afectación del rendimiento FV} = 1 - \frac{F_{i(mixta)}}{F_{i(Sur)}} = 1 - \frac{0.74}{0.89} = 16.9\%$$

Podemos emplear un índice simple de eficiencia del sistema, relacionando el volumen diario extraído con la potencia instalada en el generador fotovoltaico:

$$\epsilon_{SBFV} = \frac{Q_p(l/día)}{P_p(W_p)} = \frac{8.55 (m^3/día) \cdot \frac{1000 (l)}{(m^3)}}{880 (W_p)} = 9.71 (l/W_p)$$

El índice de calidad más empleado en sistemas fotovoltaicos es conocido como *Performance Ratio*, o PR. Este índice se emplea en sistemas de generación fotovoltaicos conectados a red, pero existe una forma de adaptarlo a sistemas de bombeo fotovoltaicos.

Esta redefinición del concepto PR resulta de gran utilidad, puesto que en el sector fotovoltaico es un término de referencia. El autor, Luis Narvarte, es un experto en bombeo fotovoltaico y propone la definición de un PR asociado a la conversión en energía hidráulica de la bomba de la siguiente manera: [28]

$$PR_{HID} = \frac{E_B}{P_p} \cdot \frac{1}{\int (G/\lambda^*) dt}$$

- E_B = Energía hidráulica de bombeo
- P_p = Potencia pico instalada
- G = Irradiación
- λ^* = Irradiancia de referencia = 1000 W/m^2

Para el caso de estudio el PR será:

$$PR_{HID} = \frac{E_B}{P_p} \cdot \frac{1}{\int (G/\lambda^*) dt} = \frac{2440 \text{ (Wh/día)}}{880 \text{ (W}_p\text{)}} \cdot \frac{1}{\frac{3.55 \text{ (kWh/m}^2\text{día)}}{1 \text{ (kW/m}^2\text{)}}} = 78.1\%$$

Estudiemos ahora la capacidad del sistema para suplir la demanda. Hay que recordar que este sistema es híbrido y cuenta con conexión de respaldo a la red eléctrica. En las reuniones con miembros del CAPS se indicó que es sistema de respaldo trabaja durante la mayor parte del día, por lo que la comunidad dispone de acceso a un mayor volumen de agua diario.

El consumo medio diario en la comunidad es de $18 \text{ m}^3/\text{día}$, lo que supone varias veces el caudal teórico extraído con generación fotovoltaica pura:

$$\frac{\text{Consumo diario}}{Q_d} = \frac{18}{8.55} = 2.11$$

El consumo medio por habitante, de no existir sistema de generación de respaldo, sería:

$$V_{\text{habitante}} = \frac{8.55 \text{ (m}^3\text{/día)}}{147 \text{ habitantes}} \cdot \frac{1000 \text{ (l)}}{\text{(m}^3\text{)}} = 58.14 \text{ l.}$$

Este valor medio por habitante es suficiente, según datos de la OMS se considera un abastecimiento básico un volumen de 50 l/persona día . [31]

Análisis experimental

A continuación, evaluaremos el comportamiento real del sistema. Para ello emplearemos los datos obtenidos previamente. Tomaremos los valores correspondientes a una irradiancia de condiciones estándar de medida ($\lambda = 1000 \text{ W/m}^2$).

En primer lugar, calcularemos el caudal diario medio a partir del caudal pico registrado y las horas solares pico (HSP).

- $Q_p = 1.18 \text{ m}^3/\text{h}$.
- $\text{HSP} = 3.55 \text{ h/día}$

$$Q_d = Q_p \cdot \text{HSP} = 1.18 \cdot 3.55 = 4.19 \text{ m}^3/\text{día}.$$

Como se pudo comprobar en el análisis de potencia, esta alcanzaba un valor asintótico en altas irradiancias ($P_1 = 740 \text{ W}_p$). Si suponemos un rendimiento del inversor $\eta_{\text{inversor}} = 0.95$, es posible calcular la potencia pico que entrega el generador fotovoltaico en condiciones reales.

$$P_{p(\text{exp})} = \frac{P_1}{\eta_{\text{inversor}}} = \frac{740}{0.95} = 779 \text{ W}_p$$

Podemos determinar, por lo tanto, que el generador fotovoltaico ha visto reducido su rendimiento de la siguiente manera:

$$\text{Afectación del rendimiento} = 1 - \frac{P_1}{P_p} = 1 - \frac{779}{880} = 11.5\%$$

En sistemas con inversores y seguimiento MPPT es normal encontrar pérdidas en torno al 5%, el otro 10.9% puede ser debido a otros factores tales como suciedad acumulada, degradación de las células fotovoltaicas (LID), etc. El factor más probable de esta pérdida de rendimiento es la orientación de los paneles, como se vio anteriormente.

Podemos emplear un índice simple de eficiencia del sistema, relacionando el volumen diario extraído con la potencia instalada en el generador fotovoltaico:

$$\epsilon_{SBFV} = \frac{Q_p(l/\text{día})}{P_p(W_p)} = \frac{4.19 (m^3/\text{día}) \cdot \frac{1000 (l)}{(m^3)}}{880 (W_p)} = 4.76 (l/W_p)$$

Tal y como se explicó anteriormente, se aplicará el mismo índice PR [28]. No obstante, en este caso no se puede emplear el valor de energía hidráulica de bombeo calculado teóricamente, pues el caudal es diferente. Recalcularemos en valor de dicha energía con las condiciones reales de caudal y empleando el mismo valor de rendimiento de la bomba ($\eta_B = 0.4$):

- $H_{te} = 63 \text{ m.}$
- $P_p = 880 \text{ W}$
- $G_{dm}(\alpha, \beta) = 3.55 \text{ kWh/m}^2 \text{ día}$

$$E_B = \frac{E_H}{\eta_B} = \frac{\rho g Q_d H_{te}}{3600 \eta_B} = \frac{997 \cdot 9.81 \cdot 4.19 \cdot 63}{3600 \cdot 0.4} = 1.79 \text{ kWh/día}$$

$$PR_{HID} = \frac{E_B}{P_p} \cdot \frac{1}{\int (G/\lambda^*) dt} = \frac{1390 \text{ (Wh/día)}}{880 \text{ (W}_p)} \cdot \frac{1}{\frac{3.55 \text{ (kWh/m}^2 \text{ día)}}{1 \text{ (kW/m}^2)}} = 44.5\%$$

Estudiemos ahora la capacidad del sistema para suplir la demanda. Hay que recordar que este sistema es híbrido y cuenta con conexión de respaldo a la red eléctrica. En las reuniones con miembros del CAPS se indicó que es sistema de respaldo trabaja durante la mayor parte del día, por lo que la comunidad dispone de acceso a un mayor volumen de agua diario.

El consumo medio diario en la comunidad es de $18 \text{ m}^3/\text{día}$, lo que supone varias veces el caudal teórico extraído con generación fotovoltaica pura:

$$\frac{\text{Consumo diario}}{Q_d} = \frac{18}{4.19} = 4.3$$

El consumo medio por habitante, de no existir sistema de generación de respaldo, sería:

$$V_{habitante} = \frac{4.19 \text{ (m}^3/\text{día)}}{147 \text{ habitantes}} \cdot \frac{1000 \text{ (l)}}{\text{(m}^3)} = 28.5 \text{ l.}$$

Este valor medio por habitante es alarmantemente bajo, según datos de la OMS se considera un abastecimiento básico un volumen de 50 l/persona día [31], lo que supone casi el doble que esta cantidad.

Comparación de resultados y conclusiones

En vista a los datos obtenidos tanto en el estudio teórico como en el análisis experimental podemos observar una diferencia patente de rendimiento real frente al teórico. Si bien es cierto que pueden existir errores debido a las suposiciones y simplificaciones realizadas en el estudio, sigue existiendo una notable diferencia en el caudal extraído por la bomba.

Caudal

En el estudio teórico se ha podido comprobar que el dimensionamiento del sistema puede cumplir, al límite de lo aceptable, las necesidades básicas de los miembros de la comunidad proporcionando un volumen medio por habitante de 58.14 l/día . No obstante, se considera un margen de seguridad muy ajustado, más propio de un abastecimiento de supervivencia que de un sistema adecuado. El volumen de bombeo diario se sitúa en $8.55 \text{ m}^3/\text{día}$, respecto al consumo medio de $18 \text{ m}^3/\text{día}$.

En el caso del análisis experimental este ha revelado un caudal máximo de bombeo muy inferior al valor teórico, siendo el caudal pico real aproximadamente la mitad del teórico:

- $Q_{p(\text{exp})} = 1.18 \text{ m}^3/\text{h}$
- $Q_{p(\text{teo})} = 2.41 \text{ m}^3/\text{h}$

Con el caudal medido y la información disponible del recurso solar resulta evidente que el sistema no puede suplir ni siquiera las necesidades mínimas de la comunidad, pues una persona no puede mantener unas condiciones aceptables de salud e higiene con un volumen de agua de 28.5 l/día [31]

Rendimiento del sistema

La diferencia patente entre volúmenes de agua bombeada es debida a un rendimiento deficiente del sistema, puesto que su comportamiento real se desvía completamente de sus supuestas condiciones de trabajo. Si comparamos los indicadores de rendimientos estudiados podemos intentar profundizar para encontrar las causas de este comportamiento.

En primer lugar, se analizará el comportamiento del generador fotovoltaico para determinar la pérdida de rendimiento sufrida en este elemento.

Como se ha visto tras el análisis de los datos experimentales de potencia de entrada a la bomba, el generador fotovoltaico está operando con una potencia pico real $P_{p(\text{exp})} = 779 \text{ W}_p$. Esto supone una pérdida de potencia del 11.5 %, lo cual se considera un valor dentro de la normalidad. Es posible que, tras varios años de funcionamiento, haya sufrido degradación en sus células debido a diversos efectos (como LID, previamente explicado). El problema, por lo tanto, no está en el generador fotovoltaico.

Comparando los índices PR de ambos estudios observamos una gran diferencia, la cual supone una pérdida del 33.9 % en condiciones reales frente a condiciones teóricas.

- $PR_{HID(\text{exp})} = 44.5\%$
- $PR_{HID(\text{teo})} = 78.1\%$

Si profundizamos en la ecuación que define el PR [28] nos encontramos con que esta diferencia se debe al valor de la energía hidráulica de bombeo. El cálculo de esta energía arroja un resultado mucho menor en condiciones reales, al ser el caudal aproximadamente la mitad del valor teórico.

$$PR_{HID} = \frac{E_B}{P_p} \cdot \frac{1}{\int (G/\lambda^*) dt}$$

- $E_{B(\text{teo})} = 2.44 \text{ (kWh/día)}$
- $E_{B(\text{exp})} = 1.79 \text{ (kWh/día)}$

Si suponemos que el recurso solar ha sido estimado correctamente y, por tanto, la energía disponible de bombeo se acerca a su valor teórico, la única opción que explica la disminución del caudal es por pérdidas o por un rendimiento muy bajo del conjunto motor-bomba.

$$E_B = \frac{E_H}{\eta_B} = \frac{\rho g Q_d H_{te}}{3600 \eta_B}$$

En una primera comprobación del comportamiento de la bomba empleando software de Grundfos se han definido los siguientes parámetros de funcionamiento:

- $P_1 = 740 \text{ W}$
- $H_{te} = 60 \text{ m.}$

En la siguiente gráfica se puede observar el punto de trabajo de la bomba en su curva característica:

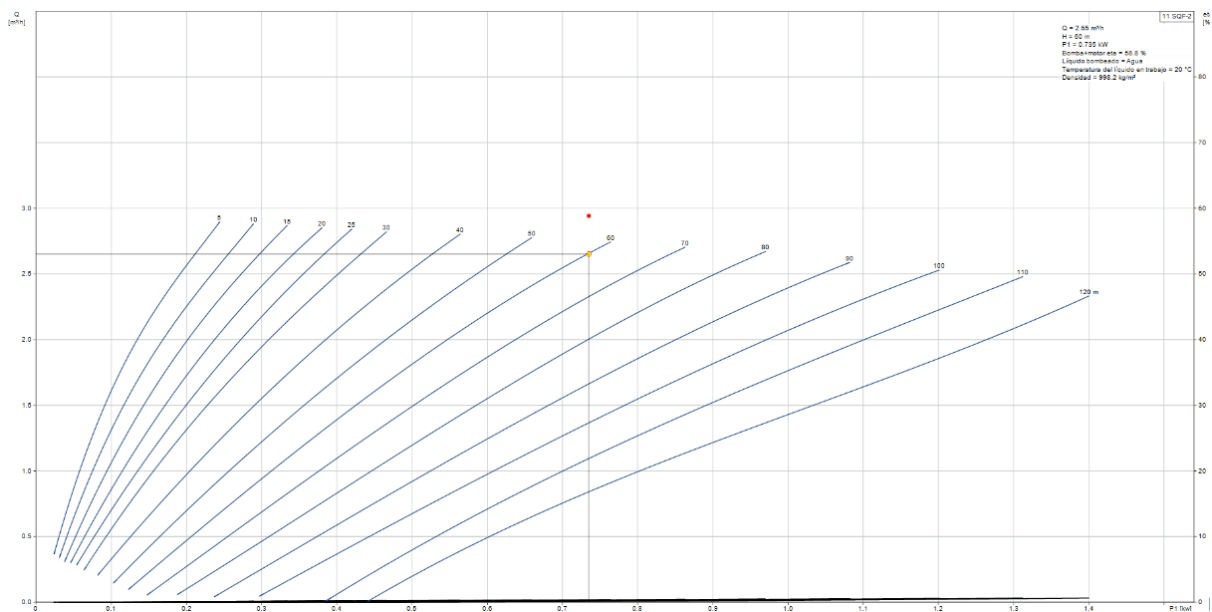


Figura 52 Curva característica de la bomba. [29]

Como se puede observar, el caudal esperado para este modelo de bomba en las condiciones de funcionamiento reales debería ser $Q_p = 2.55 \text{ m}^3/\text{h}$, ligeramente superior al valor teórico que hemos calculado previamente.

A partir de esta información podemos determinar que la causa más probable sea debida a pérdidas. Si se hace la suposición de que la energía hidráulica teórica es correcta y aplicable al modelo real, la diferencia de caudal conllevará un incremento de la altura total equivalente asociada.

- $Q_{d(exp)} = 4.19 \text{ m}^3/\text{día}$
- $H_{est} = 52.2 \text{ m.}$
- $H_{abatimiento} = 0.465 \cdot Q_d = 1.95 \text{ m.}$
- $H_{p(teo)} = 6.8 \text{ m.}$

$$E_B = \frac{\rho g Q_d H_{te}}{3600 \eta_B} = 2.44 \text{ kWh/día}$$

$$H_{te}^* = E_B \cdot \frac{3600 \eta_B}{\rho g Q_d} = 2440 \cdot \frac{3600 \cdot 0.4}{997 \cdot 9.81 \cdot 4.19} = 85.74 \text{ m.}$$

Para aproximar un valor de pérdidas se calculará la altura equivalente en pérdidas, su incremento respecto al cálculo inicial y su relación con la altura estática:

$$H_{te}^* = H_{est} + H_{abatimiento} + H_p^*$$

$$H_p^* = H_{te}^* - H_{est} - H_{abatimiento} = 85.74 - 52.2 - 1.95 = 31.6 \text{ m.}$$

$$\frac{H_p^*}{H_p} = \frac{31.6}{6.8} = 4.65 \text{ veces más pérdidas que las estimadas}$$

$$\frac{H_p^*}{H_{est}} = \frac{31.6}{52.2} = 60.5 \%$$

De ser correcto, nos encontraríamos ante un sistema colapsado por pérdidas de carga de gran importancia que impiden su funcionamiento adecuado.

3.2.6 Problemas identificados

Dimensionamiento del sistema

El principal problema del sistema de bombeo fotovoltaico de “El Limón” es el dimensionamiento que se realizó del mismo, agravado por el crecimiento de la demanda en los últimos años. En el momento de realizarse el proyecto no se estimó adecuadamente el crecimiento de la misma, provocando problemas de escasez de agua en la actualidad.

Como podemos comprobar con los datos que disponemos, el consumo medio de agua diario se sitúa en torno a los 18 m^3 . Aun suponiendo que pudiéramos bombear con el sistema fotovoltaico en condiciones ideales necesitaríamos: $18 (\text{m}^3)/1.2 (\text{m}^3/\text{h}) = 15 \text{ h}$ de bombeo al día en condiciones ideales. Según el encargado de mantenimiento del sistema este se conecta a energía fotovoltaica una media de 2 horas en invierno y 5 en verano.

Obviamente, esto no es posible. Podemos asegurar por tanto que la demanda ha superado con creces a la capacidad de bombeo del sistema fotovoltaico, relegando este a un segundo plano a la hora de satisfacer las necesidades de agua de la comunidad.

Dependencia del sistema de respaldo

En los primeros meses de 2015 se instala el sistema de respaldo, que permite la interconexión del sistema a la red eléctrica y su conmutación con los paneles.

La gran mayoría del agua es bombeada utilizando el sistema de conexión a red eléctrica convencional. El papel del sistema de bombeo fotovoltaico no es otro que el de reducir la cantidad de energía obtenida a través de la red eléctrica, con el impacto económico que esto supone para la comunidad.

Pese a tener un sistema alternativo para aportar energía a la bomba, esto apenas es suficiente para satisfacer la demanda de la población. Dados los cálculos de caudal realizados, satisfacer la demanda media diaria supone: $18 \text{ m}^3/1.45 \text{ m}^3/\text{h} = 12.5 \text{ h}$ de bombeo conectado a red eléctrica.

Rendimiento del sistema

El rendimiento del sistema es deficitario en condiciones reales, tal y como se ha podido comprobar en el estudio previo. El principal problema se encuentra relacionado con el componente hidráulico, y no con el fotovoltaico. Los índices de rendimiento y las diferencias de caudal son obvias.

Es interesante observar como la bomba, aun cuando está conectada a la red eléctrica, no supera un caudal de $1.45 \text{ m}^3/\text{h}$. Esta bomba debería poder extraer mayores caudales de agua y está trabajando en unas condiciones pobres de rendimiento. Puede deberse a varios factores, como la existencia de pérdidas de carga no identificadas en el sistema o la degradación de los componentes de la bomba, provocando una caída drástica del rendimiento

Escasez de agua almacenada en la pila

Como hemos podido comprobar en diferentes visitas a la comunidad, el nivel de agua en la pila de almacenamiento es preocupantemente bajo. La capacidad de esta es de 15 m³, lo cual ya es un problema en sí mismo, pues la capacidad de almacenamiento es inferior a la demanda media diaria. Esto supone que no existe ningún tipo de reserva de agua para la comunidad. Cualquier eventualidad en el sistema dejaría inmediatamente sin suministro a toda la comunidad.

En la última visita al sistema se procedió a medir el volumen aproximado de agua en la pila de almacenamiento. La columna de agua medida apenas superaba los 16 cm, lo que supone una cantidad de agua almacenada de 1.2 m³.

Este bajo nivel repercute negativamente en el sistema de distribución, al contar con una menor columna de agua. Muchos de los usuarios de las partes altas de la comunidad han notificado de cortes de suministro, posiblemente debido a una insuficiente diferencia de presión en el circuito de distribución.

En reuniones con miembros del CAPS se explicaron las posibles consecuencias de cualquier eventualidad en el abastecimiento y se recomendó incrementar ligeramente las horas de conexión al sistema de respaldo para crear una pequeña reserva en la pila de almacenamiento

Uso irresponsable del agua

Al estudiar los datos de consumo de la comunidad detectamos varias anomalías. Lo más destacado es el consumo de ciertos domicilios de la comunidad. La media mensual de consumo por domicilio es de 10.86 m³, pero varias familias tienen consumos medios de más de 20 m³ y hasta superiores a 30 m³. Algunos meses hay consumos puntuales entre 40 y 50 m³ entre algunas de dichas familias.

El motivo de este gasto desorbitado (hablamos de medias de 1.500 litros diarios en algunos casos) se cree que es el empleo de agua del pozo para la construcción de edificios. Según el reglamento del CAPS el uso del agua del pozo queda restringido al consumo domiciliario, pero en la práctica comprobamos que no es así.

La mayoría de familias están bien concienciadas con la importancia del agua y emplean medidas de ahorro en su vida cotidiana, especialmente aquellas con mayor tiempo de vivir en la comunidad. Aquellos que vivieron los problemas de agua que sufrió la comunidad en el pasado tienen una mayor responsabilidad y conciencia de ahorro. No obstante, algunas de las familias con mayor capacidad económica no implementan estas medidas.

La falta de control por parte del CAPS influye de manera negativa en este asunto. De igual manera, sería interesante el planteamiento de tarifas diferenciadas en función del volumen de consumo. En esta comunidad, al existir sistemas de micro medición, sería muy útil su implantación. Ya existen antecedentes de éxito en otras comunidades de la zona.

Otra opción interesante sería la publicación de las lecturas de consumo domiciliarias, ofreciendo acceso a la comunidad a información relevante. La propia presión social actuaría sobre los usuarios más derrochadores

Disminución del nivel del pozo

El nivel de agua disponible en el pozo se ha ido reduciendo con el paso de los años. El aumento de la demanda ha provocado la extracción de una mayor cantidad de agua del pozo. Las sequías de los últimos años también han afectado seriamente a la capacidad de recuperación del mismo y a la reducción de los niveles.

Por desgracia no disponemos de datos históricos de nivel de agua en el pozo, únicamente podemos observar una disminución de 2 metros entre invierno de 2016 y verano de 2015, lo cual es señal clara de este problema.

El nivel dinámico actual se encuentra en torno a los 26.6 m. y la bomba está instalada a 30 metros de profundidad, apenas 3.4 m. por debajo. Esto supone un peligro inminente para la integridad de la bomba, ya que una reducción continuada del nivel del pozo la expondría a un funcionamiento en seco. Según información de los miembros del CAPS la bomba posee un sensor de nivel con objeto de protegerla en este caso, por lo que se encuentra protegida. No obstante, se ha recomendado a los miembros de la comunidad la profundización de la bomba otros 6 m. como medida preventiva.

Orientación inadecuada de los paneles fotovoltaicos

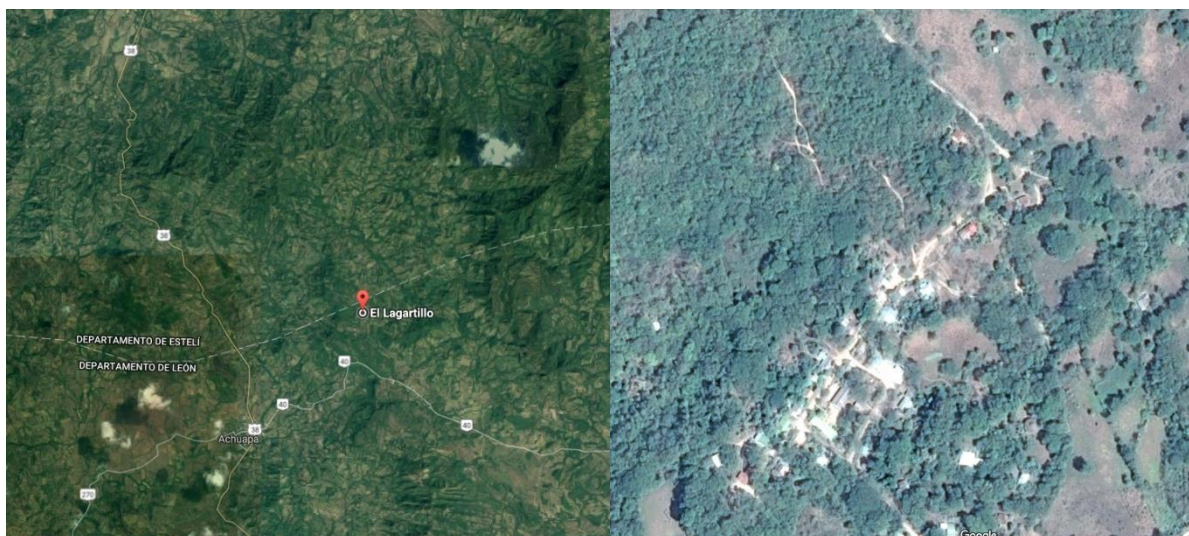
El arreglo de 11 paneles fotovoltaicos se encuentra instalado en una estructura móvil con un grado de libertad. En una primera inspección visual resulta evidente que esta se encuentra inclinada en torno a dos ejes diferentes, perpendiculares entre sí.

Pudimos comprobar, gracias a la brújula del GPS, como el eje móvil de la estructura no se instaló sobre el eje Norte – Sur, sino sobre el eje Este – Oeste. Los paneles presentan una orientación principal hacia el Este con una leve inclinación también hacia el Sur.

Se desconoce el motivo de realizar la instalación del arreglo de paneles fotovoltaicos de dicha forma, en caso de poder contactar con los responsables de la misma sería interesante saber si se trata de un error y, en caso negativo, intentar averiguar los motivos.

3.3 El Lagartillo

“El Lagartillo” es una comunidad rural situada a 6 km. del municipio de Achuapa, en el departamento de León. Se encuentra en las coordenadas 13.084 latitud Norte y -86.557 de longitud Oeste a una altitud de 544 msnm. la temperatura media anual es de 24°C.



Imágenes vía satélite. Fuente: Google Maps

Se trata de una pequeña comunidad rural agrícola y ganadera compuesta por 120 personas, repartidas en 35 domicilios. Cuenta con una escuela de español para extranjeros, la cual aloja grupos de 4 o 5 estudiantes. Se encuentra mal comunicada, la población más cercana es el municipio de Achuapa y la ciudad más cercana Estelí, pero el trayecto es sobre una carretera sin asfaltar y lleva en torno a hora y media (más de dos horas en autobús).

La comunidad de “El Lagartillo” se estableció en 1983 entre 20 familias. Por entonces el agua se obtenía directamente de las quebradas, en condiciones poco saludables, y apenas era suficiente para satisfacer el consumo. Entre los años 1985 y 1986 se produjo una gran sequía que hizo que se secaran los nacimientos de las quebradas. Los miembros de la comunidad tenían que transportar el agua desde más de un kilómetro de distancia. Cada mañana a las cuatro de la mañana se hacía una larga fila con jarras y bidones para recoger aproximadamente cinco galones y transportarlo de vuelta a la comunidad.



Calle principal de la comunidad de “El Lagartillo”. Fuente: Autor

Se comenzó a trabajar en crear un sistema de agua más accesible. Se construye la primera pila de almacenamiento, la cual es provista de agua mediante captaciones en el bosque conducidas por gravedad. También es construido un sistema de tuberías que distribuye el agua por gravedad hasta cuatro puestos públicos para abastecer a la comunidad (un puesto para cada cinco familias).

Se contó con el apoyo de COSUDE, un organismo que apoyaba proyectos de agua coordinado con el ministerio de agua nacional. COSUDE colaboró en la construcción de los puestos de distribución públicos de agua y de dos micro captaciones, aportando materiales como tuberías, cemento, etc. La pila de almacenamiento de cemento fue construida con fondos colectivos de la comunidad y mano de obra de la misma.

En 1990, tras varios inviernos con poca lluvia, el almacenamiento de agua se redujo de forma drástica. La comunidad recibió un fondo para construir un pozo con el que poder abastecerse de agua. Se realizó una primera excavación manual sin éxito. Más tarde, con la ayuda de Thomas London (amigo de la comunidad) se logró construir un pozo funcional cerca del nacimiento del río. inicialmente se empleaba una bomba de mecate y posteriormente se instaló un molino de viento para la extracción del agua del pozo.

En el invierno de 1993 no se consiguió obtener suficiente agua para el sistema de almacenamiento para el pozo y la comunidad tuvo que depender del agua del pozo. Desafortunadamente el sistema eólico resultó ser inútil, pues el viento quedaba bloqueado por los árboles. Finalmente, este fue destruido durante una época de fuertes vientos.



Usuaría del sistema de bombeo fotovoltaico de la comunidad de “El Lagartillo” Fuente: Autor

Tras esto se instaló un sistema de bombeo consistente en una bomba sumergible y un generador Diesel. El generador requería mucho trabajo y un elevado mantenimiento. Esto, unido a la subida de precio del combustible, comprometía la viabilidad de esta solución.

En 2001 comienza una nueva crisis de agua y el generador acaba por descomponerse. Se instalan bombas manuales tipo EMAS para extraer el agua del pozo y distribuirla en la comunidad. Se establecen turnos por familias, donde un miembro de cada una debía bombear durante una hora diaria para garantizar el suministro.

En 2004 la gente de la comunidad se organiza y forma un comité destinado a tratar los asuntos relacionados con el suministro de agua. Antes no existía CAPS y tenían que ir casa por casa recolectando dinero para hacer frente a los gastos derivados del mantenimiento del sistema.

Unos años más tarde, en 2007, la comunidad recibe apoyo de la Agencia Canadiense para el Desarrollo Internacional (ACDI) para mejorar el sistema de agua. Se construyen tres nuevos puestos de agua para garantizar el suministro a viviendas de nueva construcción y se recibe un tanque suplementario de 3500 litros de capacidad.



Placa situada junto a la pila de almacenamiento del SBFV de "El Lagartillo" Fuente: Autor

El sistema es manejado por el comité de agua, que en ese momento consta de cinco personas. Se establecen turnos de limpieza de pilas y tanques por temporada y un horario mensual de tratamiento de agua (sistema de cloración). Gente que colaboraba con la comunidad en diversos proyectos les aconseja formarse como CAPS. A través de la Alcaldía consiguen información acerca de la ley 722 y se coordinan con ENACAL.

En 2010 la comunidad, apoyada por la Alcaldía y la ONG Ecología y desarrollo ECODES, realiza el proyecto de instalación de un sistema de bombeo fotovoltaico. El contacto con ECODES se hace a través de la cooperativa San Francisco, a la que pertenecen miembros del comité. Se instala un arreglo de 8 paneles FV (4SX2P) de 100 W por panel, un inversor y una bomba sumergible. La comunidad aporta mano de obra y capital valorado en 10000 C\$ (345 USD) para la compra de los terrenos y material de cableado. Se realizan ejercicios de capacitación en la comunidad.

Durante los primeros 8 meses se organizan turnos de vigilancia del sistema entre todas las familias de la comunidad debido al miedo a sufrir un robo. También se establece un sistema de rotación de tareas para la operación del sistema.

En el año 2012 se consiguen realizar los trámites para ser reconocidos como CAPS. En primer lugar, únicamente reciben apoyo de la Alcaldía. La comunidad lo considera un éxito ya que surge de la propia necesidad de estar organizados en torno a un asunto tan importante como el agua.

La comunidad reconoce esta organización y desde el primer momento participa de forma activa. Se obtiene el certificado de inscripción emitido por el INAA.

La formación del CAPS ofrece varias ventajas de diversa índole:

- Auto sostenibilidad económica: Con el pago de una cuota desaparece la necesidad de ir casa por casa recogiendo el dinero, con las dificultades que esto supone. Se comienza a generar un fondo para hacerse cargo de imprevistos, lo que genera una seguridad económica. Este fondo contaba con un total de 22.000 C\$ (760 USD) en 2015.
- Reconocimiento por parte de la comunidad. Esta lo considera un éxito ya que surge de la propia necesidad de estar organizados en torno a un asunto tan importante como el agua y desde el primer momento participa de forma activa.
- Reconocimiento legal como institución, de acuerdo a la ley 722
- Participación en intercambios de experiencias con otros CAPS y aprendizaje de otros sistemas de bombeo fotovoltaico.
- Muestreo de calidad del agua (una vez al año).

La pila original alcanza el final de su vida útil, por lo que se procede a construir una nueva que duplica su capacidad. La comunidad cuenta con el apoyo de Realigh Internacional, que aporta material, y de la Alcaldía municipal. ENACAL no participa en el proyecto.

Al no existir un sistema de micro medición se instaure una tarifa fija mensual por habitante, aumentando esta de 3 C\$ a 5 C\$ y hasta 7C\$. Es prácticamente un precio simbólico al inicio. Debido a la diferencia de miembros de las distintas familias y a que la cantidad de agua es la misma por domicilio, la comunidad se reúne y establece una nueva tarifa fija por domicilio, pues considera que es lo más justo.

Esta nueva tarifa se mantiene hasta la actualidad, siendo 35 C\$ mensuales por domicilio. Aun así, la mayoría de miembros del CAPS y muchos de los miembros de la comunidad consideran que no es suficiente para el correcto mantenimiento del sistema y la creación de un fondo de emergencia.

3.3.1 Descripción del sistema

El sistema de bombeo fotovoltaico de la comunidad de “El Lagartillo” es un sistema de bombeo directo. Este SBFV fue implementado tras los fracasos de soluciones previas tales como bombas manuales, una aerobomba o un sistema de generación Diesel.

El sistema de generación y bombeo está compuesto, básicamente, por un generador fotovoltaico, un sistema de control y una bomba sumergible situada en un pozo de excavación manual. Los elementos de control y bombeo son productos de la marca “Grundfos”. El controlador funciona como inversos DC/AC y dispone de seguimiento MPPT. Los paneles fotovoltaicos son de la marca “RWE Schott” y se encuentran situados en una estructura fija.

El sistema cuenta con una línea de conducción subterránea que conecta el pozo con la pila de almacenamiento. A su vez la pila de almacenamiento se conecta a una línea de distribución pública. No existen sistemas de micro medición de caudal excepto por el instalado a la salida del pozo.

El sistema de almacenamiento cuenta con un tanque secundario de respaldo para ser utilizado en caso de necesidad.

La conexión del sistema se realiza de forma manual en la caja donde se encuentra el controlador. Cada día se encarga un miembro de una familia diferente, rotando para que todos los usuarios hayan participado en esta actividad. Con esto se comprobó que se consigue una mayor implicación de los usuarios y se fortalece su conocimiento del sistema.

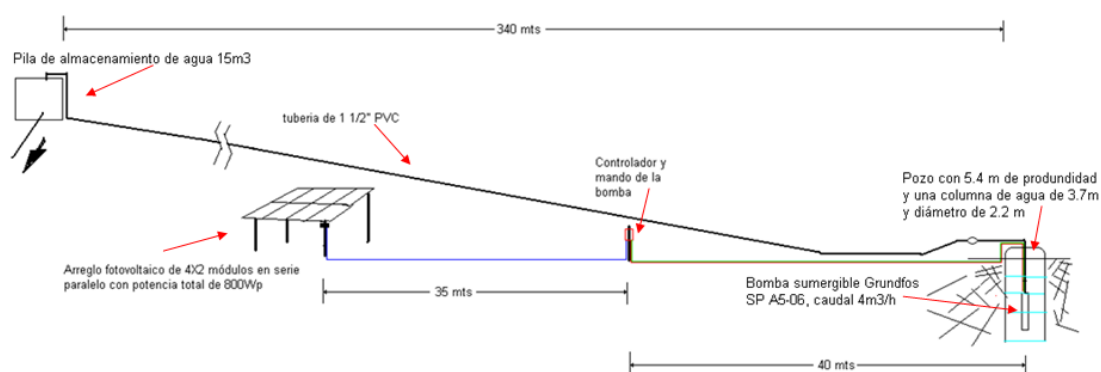


Figura 53 Esquema del SBFV instalado en la comunidad de “El Lagartillo”. Se puede observar que la pila que aparece es la antigua, de capacidad 15 m³. Fuente: Habitantes de la comunidad

Beneficiarios

El sistema de bombeo fotovoltaico de la comunidad de “El Lagartillo” cuenta con 120 beneficiarios distribuidos en 35 domicilios. Estos datos corresponden a un estudio de 2010. Teniendo en cuenta el asentamiento de una nueva familia y los estudiantes de la escuela de español estimaremos un número total de beneficiarios:

$$\text{Beneficiarios} = 130 \text{ personas}$$

3.3.2 Elementos del sistema

Pozo

La comunidad de “El Lagartillo” cuenta con un pozo excavado manualmente, de poca profundidad y gran diámetro. El pozo se encuentra situado junto a la quebrada más cercana a la comunidad y fue construido en 1990.



Cabeza del pozo de la comunidad de “El Lagartillo” Fuente: Autor

Tiene una profundidad total de 5.4 metros (medida desde la cabeza del pozo) y un diámetro de 2.2 metros. En la siguiente fotografía del interior del mismo se puede apreciar la instalación de la bomba. En el margen izquierdo de la fotografía podemos encontrar la antigua conducción de la aerobomba, la cual estuvo funcionando años antes de la instalación de un SBFV.



Interior del pozo de la comunidad de “El Lagartillo” Fuente: Autor

Pila de almacenamiento

El sistema de almacenamiento de la comunidad de “El Lagartillo” está formado por dos pilas de hormigón, una de las cuales se encuentra en desuso al haber completado su vida útil. Además, existe un tanque de almacenamiento secundario auxiliar. Se encuentra situada en las coordenadas 13°05'10.6"N, 86°33'25.3"W. En la siguiente imagen se pueden apreciar dichos elementos:



De izq. a der. Pila de almacenamiento, tanque secundario y pila en desuso. Fuente: Autor

Las dimensiones de la pila son $4.5\text{ m.} \times 4.5\text{ m.}$ de base y 2 m. de altura y el espesor de sus paredes es de 15 cm. El volumen total de almacenamiento es, por tanto:

$$V_{pila}(m^3) = (4.5 - 2 \cdot 0.15)^2 \cdot 2 = 35.28\text{ m}^3.$$

La entrada de agua está situada en la parte superior de la pila. En la pila antiguo se hacía circular una parte del fluido en paralelo a través de un sistema clorador para su tratamiento, pero este no se ha instalado en la pila nueva

$$h_{\text{vertido pila}} = 2\text{ m.}$$

El tanque secundario es un tanque prefabricado, como se puede apreciar en la imagen. Tiene una capacidad de 3 m^3 .

$$V_{\text{tanque}}(m^3) = 3\text{ m}^3.$$

La capacidad combinada del sistema de almacenamiento es:

$$\begin{aligned} V_{\text{alm}}(m^3) &= V_{\text{pila}}(m^3) + V_{\text{tanque}}(m^3) = \\ &= 35.28 + 3 = 38.28\text{ m}^3. \end{aligned}$$



Tanque de almacenamiento secundario

Generador fotovoltaico

En la comunidad de “El Lagartillo” el generador fotovoltaico está compuesto por un arreglo de 8 paneles en una estructura fija de soporte situada a cierta altura del suelo. Es común encontrar generadores fotovoltaicos en estructuras elevadas, pues evita problemas de sombreado y dificulta el posible robo de sus componentes.



Generador fotovoltaico de la comunidad de “El Lagartillo” Fuente: Autor

Los módulos fotovoltaicos instalados en esta comunidad son de la marca “RWE Schott”, concretamente el modelo **ASE-100-GT-FT-K E 1205**. Se trata de paneles fotovoltaicos de Silicio policristalino con 72 células por módulo. Cuentan con la certificación IEC 61215. A continuación, se adjuntan las especificaciones técnicas de los mismos:

- $P_{max} = 100 W_p$.
- $V_{pmax} = 34.5 V$.
- $V_{oc} = 42.5 V$.
- $I_{pmax} = 2.8 A$.
- $I_{sc} = 3.2 A$.
- $V_{max sistema} = 750 V$. (IEC 61215)
- *Coefficientes de temperatura:*
 - $\delta_V = -0.38 \%/^{\circ}C$
 - $\delta_i = +0.10 \%/^{\circ}C$
 - $\delta = -0.47 \%/^{\circ}C$

*CEM ($1000 W/m^2$; $25^{\circ}C$)

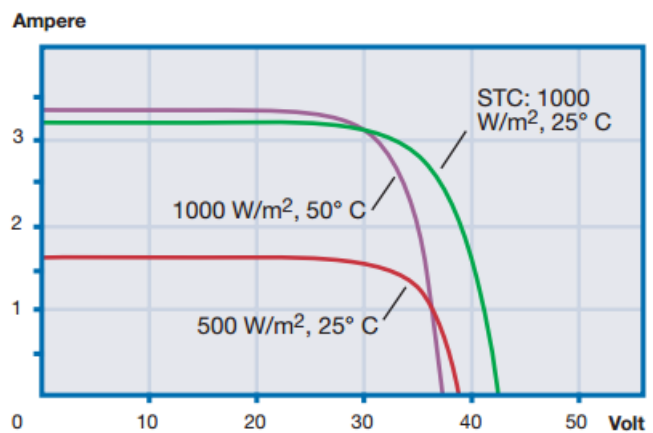


Figura 54 Curva característica del módulo ASE-100-GT-FT-K E 1205

El arreglo está compuesto por dos ramas en paralelo de cuatro módulos en serie cada una. Se trata de un arreglo 4SX2P. La potencia total instalada es:

$$P_p = n_{\text{módulos}} \cdot P_{max} = 8 \cdot 100 (W_p) = 800 (W_p)$$

Los módulos están instalados con orientación Sur y un ángulo de inclinación $\beta = 15^{\circ}$

Controlador

El sistema cuenta con un controlador de la marca “Grundfos”, concretamente el modelo “Solartronic SA 1500”. Se trata de un inversor DC/AC que actúa también como controlador de la bomba mediante variación de frecuencia. Emplea sistema de seguimiento MPPT.

En la siguiente tabla se adjuntan los parámetros eléctricos del controlador:

Tabla 14 Parámetros eléctricos del controlador [29]

Entrada (DC)	Nominal	Máximo	Mínimo
Tensión en carga	120 V	140 V	100 V
Tensión en vacío	155 V	175 V	115 V
Corriente en carga	12.5 A	14.0 A	-
Potencia	1500 W	1960 W	-
Funcionamiento con batería	120 V	140 V	100 V
Salida (AC trifásica)	Nominal	Máximo	Mínimo
Corriente	-	14.0 A	-
Frecuencia	-	63 Hz	7 Hz
Rendimiento	0.96	0.97	0.95
Funcionamiento con batería	60 Hz	-	-



Controlador instalado en el sistema de “El Lagartillo”, foto exterior, interior y diagrama de conexiones.

Fuente: Autor

Línea de conducción y distribución

La línea de conducción entre el pozo y la pila de almacenamiento se encuentra enterrada y es inaccesible. Según los datos aportados por un informe elaborado por miembros de la comunidad esta tiene una longitud de 340 metros.

$$L_{\text{pozo-pila}} = 340 \text{ m.}$$

Está compuesto por secciones de tubo de PVC de 1.5 pulgadas de diámetro, lo que equivale a:

$$\phi_{\text{tubería}} = 1.5 \text{ pulgadas} = 3.81 \text{ cm.}$$

La línea de distribución abastece a 7 puestos públicos en toda la comunidad de “El Lagartillo”. Según los datos aportados por miembros de la comunidad tiene una longitud total de 1500 m.

$$L_{\text{distribución}} = 1500 \text{ m.}$$



Inicio de la línea de conducción de la comunidad de “El Lagartillo” y esquema de los puestos públicos de consumo.

Fuente: Autor

Bomba

El conjunto motor-bomba que encontramos en la comunidad de “El Lagartillo” pertenece a la familia “SP” de la marca “Grundfos”. En el documento elaborado por miembros de la comunidad se define el modelo de la bomba como “SP A5-06”, pero lamentablemente no corresponde a ningún modelo real de “Grundfos”. Buscando en su catálogo se ha localizado la bomba “SP 5A-6”, por lo que es posible que se trate de una errata en el documento y quiera referirse a esta bomba.

- Tipo de motor = MS402
- Potencia de entrada (P_2) = 0.55 kW
- Tensión nominal AC = 220~240 V
- Corriente nominal = 4 A
- Factor de potencia = 0.99
- Velocidad nominal = 2820~2850 rpm
- Tipo de arranque = directo
- Grado de protección (IEC 34 – 5) = IP68
- Clase de aislamiento (IEC 85) = B

Curva de rendimiento:

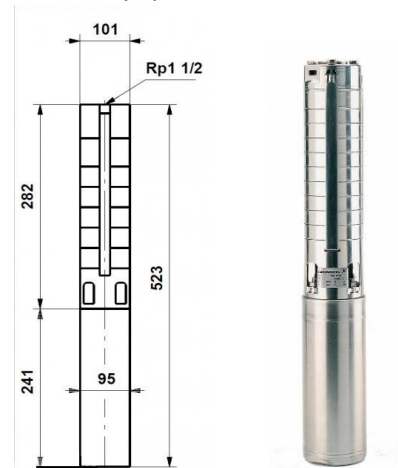


Figura 55 Bomba SP A5-06 [29]

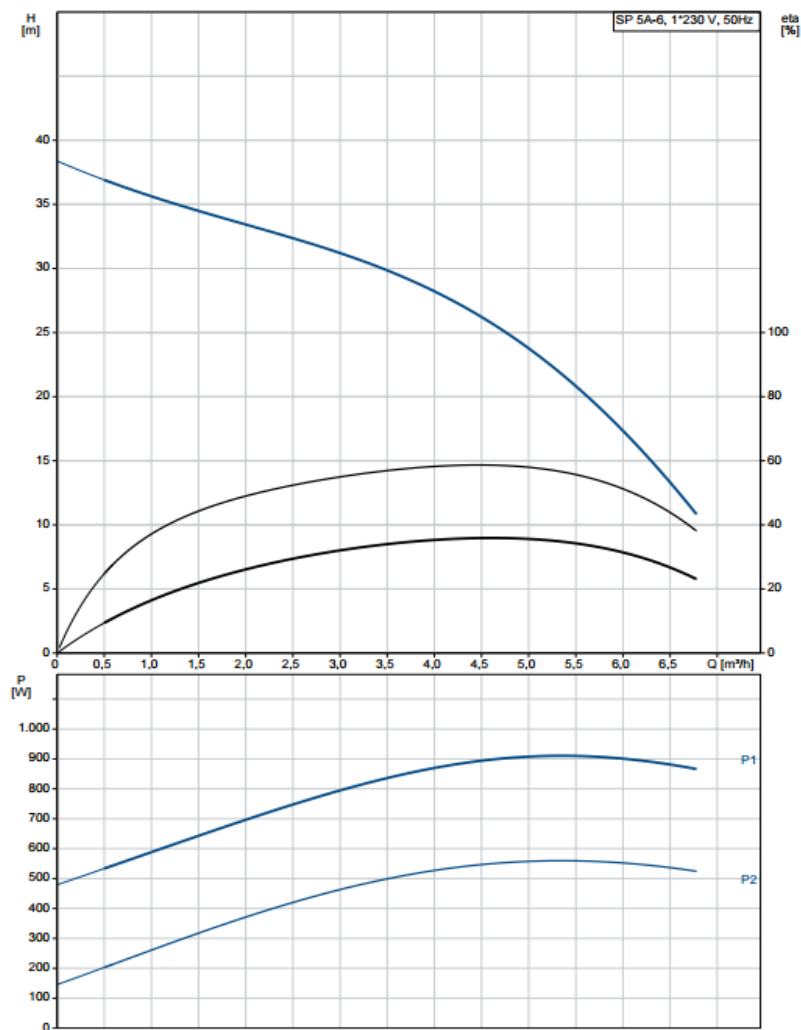


Figura 56 Curva característica de la bomba. [29]

3.3.3 Estudio teórico

En el siguiente estudio de carácter teórico se pretende calcular los parámetros de funcionamiento teóricos del sistema, el caudal que extraería en esas condiciones y la eficiencia del sistema.

Teniendo en cuenta las características de los elementos definida previamente se emplearán los métodos de dimensionamiento de un sistema, con la particularidad de ejecutarse de forma inversa. Esto quiere decir que, a partir de los equipos instalados y el recurso solar disponible, se calcularán las necesidades hidráulicas que puede satisfacer el sistema.

Datos

- Coordenadas = $13^{\circ}05'01.6''N, 86^{\circ}33'28.1''W$
- Beneficiarios = 130 personas
- $V_{alm} = 38.28 m^3$.
- $L_{pozo-pila} = 340 m$.
- $\phi_{tuberia} = 3.81 cm$.
- $P_p = 800 W$.
- $P_2 = 0.55 kW$.
- $\beta = 15^{\circ}$

Determinación del recurso solar

En primer lugar, se determinará el recurso solar disponible en cada mes del año. Es necesario recopilar los datos de radiación solar pero no tenemos datos para compararlos con el modelo de consumo, al no existir sistema de micro medición. Con esto se pretende estimar el mes peor para estudiar el sistema en sus condiciones más críticas. Para ello se ha consultado la base de datos de la NASA obteniendo los siguientes valores:

Tabla 15 valores de radiación solar y temperatura media del aire. Fuente: [33]

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
$G_{dm}(0)$ (kWh/m^2d)	5.06	5.65	6.35	6.26	5.62	5.55	5.46	5.53	5.21	5.03	4.91	4.88
T_{aire} ($^{\circ}C$)	22.7	24.0	25.3	26.4	25.4	24.2	23.8	23.9	23.7	23.2	22.7	22.5

Podemos observar como la época con el recurso solar disponible menor comprende de octubre a enero. Al no contar con datos acerca del consumo tomaremos como mes peor enero. Esta elección se debe a dos razones: la radiación solar disponible es de las menores y es el primer mes de la estación seca, por lo que podemos suponer que el consumo de agua será mayor.

Una vez identificado el mes peor podemos calcular la radiación solar media en las condiciones de la instalación ($\beta = 15^{\circ}$). Para el mes de enero y en las coordenadas referidas podemos extraer los siguientes datos:

- $G_{dm}(0)$ (enero) = $5.06 kWh/m^2 día$.
- $\beta_{opt} = 39^{\circ}$
- $G_{dm}(0^{\circ}, \beta_{opt}) = 6.14 kWh/m^2 día$. (Base de datos de la NASA [33])

A partir de las ecuaciones previamente definidas en el apartado de dimensionamiento se puede calcular la radiación solar media diaria. Dado que no se pudo realizar un estudio adecuado del emplazamiento del generador fotovoltaico se realizarán los cálculos con un factor de sombreado estimado $F_s = 0.8$.

$$G_{dm}(\alpha, \beta) = G_{dm}(0) \cdot F_i \cdot F_s \cdot K$$

$$F_s = 0.8$$

$$K = \frac{G_{dm}(0^\circ, \beta_{opt})}{G_{dm}(0)} = \frac{6.14}{5.06} = 1.21$$

$$F_i = 1 - \left(1.2 \cdot 10^{-4} (\beta - \beta_{opt})^2\right) = 1 - (1.2 \cdot 10^{-4} (15 - 39)^2) = 0.93$$

$$G_{dm}(\alpha, \beta) = G_{dm}(0) \cdot F_i \cdot F_s \cdot K = 5.06 \cdot 0.93 \cdot 0.8 \cdot 1.21 = 4.56 \text{ kWh/m}^2 \text{ día}$$

Con la radiación solar media diaria determinada y conociendo la potencia total instalada es posible calcular la energía de bombeo teórica del sistema. Para ello se emplea el área equivalente de paneles y el rendimiento del generador fotovoltaico.

$$\eta_{fv} = F_m (1 - \delta(T_m - 25)) \eta_{CEM}$$

Al tratarse de un sistema con seguidor MPPT incorporado emplearemos un factor de acoplo:

$$F_m = 0.95$$

Para calcular la temperatura media de célula tomaremos la temperatura media del aire en enero de la base de datos ($T_a = 22.7^\circ\text{C}$) y la irradiancia global incidente (consideraremos condiciones estándar de medida)

$$T_m = T_a + 0.03 \lambda = 22.7 + 0.03 \cdot 1000 = 52.7^\circ\text{C}$$

El generador fotovoltaico está compuesto por módulos de silicio policristalino. Como podemos observar en su hoja de características la variación de la potencia con la temperatura para estos módulos es $\delta = 0.0047$. El rendimiento del generador es, por tanto:

$$\eta_{fv} = F_m (1 - \delta(T_m - 25)) \eta_{CEM} = 0.95 (1 - 0.0047 \cdot (52.7 - 25)) \eta_{CEM} =$$

$$\eta_{fv} = 0.83 \eta_{CEM}$$

El área equivalente de paneles lo podemos relacionar tanto con la energía de bombeo como con la potencia instalada del generador fotovoltaico:

$$A_{\text{paneles}} = \frac{E_B}{G_{dm}(\alpha, \beta) \eta_{fv}}$$

$$P_p = A_{\text{paneles}} \cdot \lambda_{CEM} \cdot \eta_{CEM} = \frac{E_B \cdot \lambda_{CEM} \cdot \eta_{CEM}}{G_{dm}(\alpha, \beta) \eta_{fv}} = 0.8 \text{ kW}_p$$

$$E_B = \frac{0.8 \text{ (kW}_p) G_{dm}(\alpha, \beta) \eta_{fv}}{\lambda_{CEM} \cdot \eta_{CEM}} = \frac{0.8 \text{ (kW}_p) \cdot 4.56 \text{ (kWh/m}^2 \text{ día)} \cdot 0.83 \cdot \eta_{CEM}}{1 \text{ (kW/m}^2) \cdot \eta_{CEM}}$$

$$= 3.03 \text{ (kWh/día)}$$

Conociendo la energía de bombeo que provee el sistema podemos seguir avanzando en su estudio con el objetivo de calcular el caudal teórico en las condiciones de funcionamiento estudiadas. En primer lugar, hemos de determinar la altura total equivalente del sistema.

$$E_B = \frac{E_H}{\eta_B} = \frac{\rho g Q_d H_{te}}{3600 \eta_B} = 3.03 \text{ (kWh/día)}$$

$$H_{te} = H_d + H_{st} + (H_{dt} - H_{st}) \left(\frac{Q_d}{Q_t} \right) + H_p$$

Al tratarse de un pozo manual de gran diámetro el efecto del abatimiento es despreciable. En un sondeo realizado en campo se registraron los siguientes datos:

- $H_{st} = 2.86 \text{ m.}$
- $H_d = 22 \text{ m.}$ (medido con GPS)

La ecuación, por tanto, queda simplificada de la siguiente manera:

$$H_{te} = H_d + H_{st} + H_p$$

Para calcular la altura equivalente por pérdidas del sistema debemos realizar varias suposiciones, ya que no disponemos de los datos necesarios. Se desconocen los accesorios instalados, por lo que las pérdidas locales se estimarán a partir de las distribuidas. La longitud total de tubería del circuito es:

$$L_{\text{pozo-pila}} = 340 \text{ m.}$$

Conocemos los datos de la línea de conducción que va del pozo a la pila (tubería de PVC de 3.81 cm de diámetro). Al tratarse del mismo tipo de tubería estudiado previamente en la comunidad de "El Limón" supondremos las mismas condiciones de circulación del fluido y emplearemos el coeficiente de fricción calculado mediante el diagrama de Moody ($f = 0.028$).

$$H_{pd} = f \cdot \frac{L v^2}{d 2g}$$

Podemos relacionar la velocidad de circulación del fluido y el caudal a partir del área la tubería, siendo esta de sección circular y $\phi_{\text{tubería}} = 3.81 \text{ cm.}$ Nótese que en este caso estamos trabajando en unidades del SI, por lo que el caudal lo medimos en m^3/s . No debe confundirse con el caudal diario " Q_d " (medido en $\text{m}^3/\text{día}$), que estamos tratando de calcular, ni el caudal pico " Q_p " (medido en m^3/h).

$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = v(\text{m/s}) \cdot A(\text{m}^2); v(\text{m/s}) = \frac{Q(\text{m}^3/\text{s})}{A(\text{m}^2)}$$

$$A_{\text{tubería}} = \frac{\pi(\phi_{\text{tubería}})^2}{4} = \frac{\pi(3.81 \cdot 10^{-2})^2}{4} = 1.14 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.$$

Hay que tener en cuenta, cuando trabajamos con sistemas de generación fotovoltaicos, que la duración de un día no son las habituales 24 horas, sino las horas solares pico. Las Horas Solares Pico (HSP) son el número de horas de irradiancia, en condiciones estándar de medida, que equivalen a la radiación solar diaria.

$$\text{HSP (h/día)} = \frac{G_{dm}(\alpha, \beta) \left(\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \text{día}} \right)}{1000 \text{ (W/m}^2\text{)}} = \frac{4560 \left(\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \text{día}} \right)}{1000 \text{ (W/m}^2\text{)}} = 4.56 \text{ (h/día)}$$

$$Q_p \text{ (m}^3\text{/h)} = \frac{Q_d \text{ (m}^3\text{/día)}}{\text{HSP(h/día)}} = \frac{Q_d}{4.56} \text{ (m}^3\text{/h)}$$

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = Q_p \text{ (m}^3\text{/h)} \cdot \frac{60 \cdot 60 \text{ (s)}}{(h)} = \frac{Q_d}{4.56} \text{ (m}^3\text{/h)} \cdot \frac{(h)}{60 \cdot 60 \text{ (s)}} = \frac{Q_d}{16416} \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Por lo tanto, la ecuación de pérdidas en función del caudal diario resulta:

$$H_{pd} = f \cdot \frac{L \left(\frac{Q}{A} \right)^2}{2g} = 0.028 \cdot \frac{340 \cdot \left(\frac{Q_d \text{ (m}^3\text{/s)}}{16416 \cdot (1.14 \cdot 10^{-3})} \right)^2}{3.81 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 9.81} = 0.036 \cdot Q_d^2$$

Como se explicó anteriormente no existe información para calcular las pérdidas locales, por lo que se estimarán como un 10% de las pérdidas distribuidas. Podemos expresar entonces la altura equivalente total por pérdidas como:

$$H_p = H_{pd} + H_{pl} = 1.1 \cdot H_{pd} = 1.1 \cdot 0.036 \cdot Q_d^2$$

$$H_p = 0.04 \cdot Q_d^2$$

Una vez expresadas la altura equivalente a pérdidas en función del caudal diario " Q_d " podemos expresar la altura total equivalente de la misma manera:

$$H_{te} = H_d + H_{st} + H_p = 22 + 2.87 + 0.04 \cdot Q_d^2$$

$$H_{te} = 24.87 + 0.04 \cdot Q_d^2$$

Volviendo a la ecuación general de bombeo:

$$E_B = \frac{E_H}{\eta_B} = \frac{\rho g Q_d H_{te}}{3600 \eta_B} = 3.03 \text{ (kWh/día)}$$

$$Q_d H_{te} = \frac{3600 \cdot \eta_B \cdot 3030 \text{ (Wh/día)}}{997 \cdot 9.81} = 1.12 \cdot 10^3 \cdot \eta_B =$$

$$= 22.87 \cdot Q_d + 0.04 \cdot Q_d^3 = 1.12 \cdot 10^3 \cdot \eta_B$$

Suponemos un valor de rendimiento de la bomba $\eta_B = 0.4$. Resolviendo la ecuación:

$$Q_d = 13.8 \text{ m}^3/\text{día}$$

A partir de este valor de caudal medio diario podemos calcular el caudal pico, la altura equivalente en pérdidas y total:

$$Q_p = \frac{Q_d}{HSP} = \frac{13.8}{4.56} = 3.02 \text{ m}^3/h.$$

$$H_p = 0.04 \cdot Q_d^2 = 0.04 \cdot 13.8^2 = 7.62 \text{ m}.$$

$$H_{te} = H_{est} + H_p = 22.87 + 7.62 = 30.48 \text{ m}.$$

3.3.4 Análisis experimental

El análisis experimental del sistema de bombeo fotovoltaico de la comunidad de “El Lagartillo” se trató de realizar de igual manera que el de la comunidad de “El Limón”, pero por una serie de causas no fue posible.

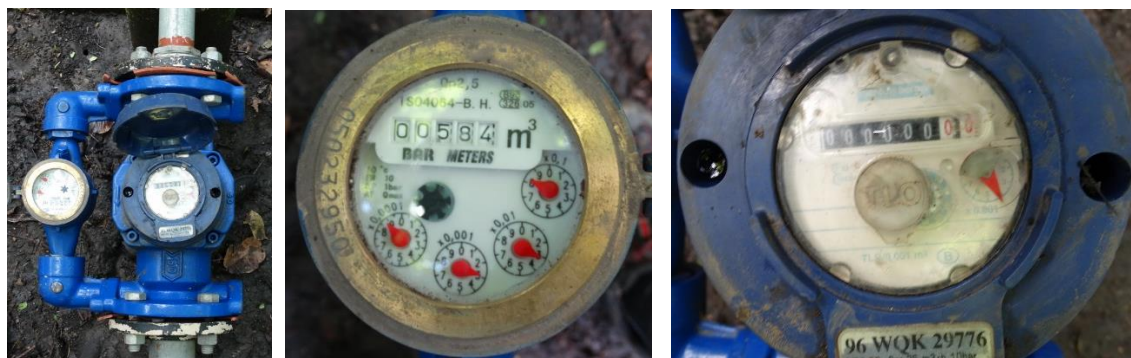
La comunidad de “El Lagartillo” se encuentra alejada de Estelí y mal comunicada por un camino sin asfaltar. Para visitar esta comunidad fue necesario conseguir una moto para hacer los desplazamientos. Al tener que viajar de esta manera el número de visitas a la comunidad fue reducido, así como la cantidad de equipamiento a transportar.

Nos encontramos ante un sistema de distribución domiciliaria sin elementos de micro medición, por lo que no podemos disponer de datos de consumo. Existen dos caudalímetros colocados a la salida del pozo, pero como veremos más adelante no funcionaban correctamente.

A continuación, se expondrán una a una las diferentes actividades de recogida de datos para el estudio, describiendo en primer lugar cómo y con qué equipo se realizaron:

Medida de caudal

Como se ha descrito existen únicamente dos caudalímetros instalados en este sistema y se sitúan a la salida del pozo. Se trata de dos caudalímetros instalados en paralelo en la línea de conducción.



Caudalímetros instalados en el SBFV de la comunidad de “El Lagartillo” Fuente: Autor

En una primera visita a la comunidad se tomaron medidas sincronizadas de caudal e irradiancia, empleando el mismo equipo y metodología aplicado anteriormente en “El Limón”. Los resultados de las mediciones de caudal son alarmantemente bajos, pero el volumen de agua bombeada a la pila era visiblemente mayor. Esto hizo suponer que podrían estar fallando y arrojando una medida errónea. Los datos obtenidos en la primera sesión de medición son los siguientes:

Tabla 16 Datos experimentales de la primera sesión

Irradiancia (W/m ²)	Caudal (m ³ /h)
640	0.152
680	0.1875
700	0.195
750	0.225

Se realizó una segunda visita diez días después en la que se pudo comprobar que el caudalímetro había acumulado 2 m^3 respecto a la primera visita. Un consumo de 2 m^3 en 10 días es algo ridículo para una comunidad, por lo que podemos concluir que no funciona correctamente.

Al no poder obtener datos fiables de caudal por medio de estas lecturas se empleó un método más rudimentario. Consistió en medir el nivel estático del pozo con el sistema en funcionamiento y regresar una hora después a repetir la medición. Conociendo la diferencia de nivel estático y la geometría del pozo se puede calcular un valor aproximado de caudal extraído.

Al carecer de un equipo de sondeo se improvisó un método con los materiales accesibles. Para calcular la diferencia de altura entre el nivel del agua y el pozo se suspendió una cuerda en el interior. Dicha cuerda llevaba un palo atado para ejercer de flotador y, cuando este llegaba al agua, se marcaba la altura en la cuerda. Posteriormente se desplegaba la cuerda para medir sobre ella con una cinta métrica. Este método también se puede emplear para sondear la profundidad, atando en el extremo de la cuerda un objeto pesado que se hunda (una piedra).



Sondeo del pozo de la comunidad de "El Lagartillo" Fuente: Autor

Para aproximar mejor el caudal deberíamos conocer la velocidad de recuperación del pozo, pero no es así. Consideraremos para el cálculo que no hay reposición en el pozo y, por lo tanto, el caudal medido será el mínimo.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Nivel estático ($t = 0$) = 2.86 m .

Nivel estático ($t = 1 \text{ h.}$) = 2.12 m .

$\Delta \text{ Nivel estático} = 2.86 - 2.12 = 0.74 \text{ m}$.

$\Delta t = 1 \text{ hora}$

Diámetro pozo = 2 m .

$$\Delta Vol = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \Delta \text{ Nivel estático} = \frac{\pi 2^2}{4} \cdot 0.74 = 2.32 \text{ m}^3$$

$$Q = \frac{\Delta Vol}{\Delta t} = \frac{2.32 \text{ m}^3}{1 \text{ h}} = 2.32 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Medición de irradiancia y efecto en el controlador

Como hemos explicado anteriormente no se pudieron obtener datos fiables de caudal y, por tanto, no pudieron realizarse mediciones sincronizadas de caudal e irradiancia para obtener una relación entre ambas.

Se pudo acceder al controlador “Grundfos Solartronic SA 1500” para tomar medidas de tensión en los bornes de sus conexiones y así obtener una relación entre la irradiancia y un parámetro del sistema. Se utilizó un multímetro para medir valores de tensión de entrada DC. Lamentablemente no se pudo disponer de una pinza amperimétrica para medir los valores de corriente y calcular así las potencias de entrada y salida al inversor.

Se realizaron dos mediciones en diferentes estados de funcionamiento del sistema: funcionamiento límite e irradiancia alta.

Funcionamiento límite del sistema

Se realizó un muestreo de 10 minutos empleando el sistema de datalogging del solarímetro en una situación de insolación variable. Debido a las rápidas variaciones de la irradiancia incidente no se pudieron tomar datos concluyentes de tensión asociados a estas medidas. No obstante, sirvió para detectar el punto de parada de la bomba ($\lambda_{parada} = 400 \text{ W/m}^2$) y el punto de arranque ($\lambda_{arranque} = 430 \text{ W/m}^2$). Los valores de irradiancia registrados se muestran en la siguiente gráfica:

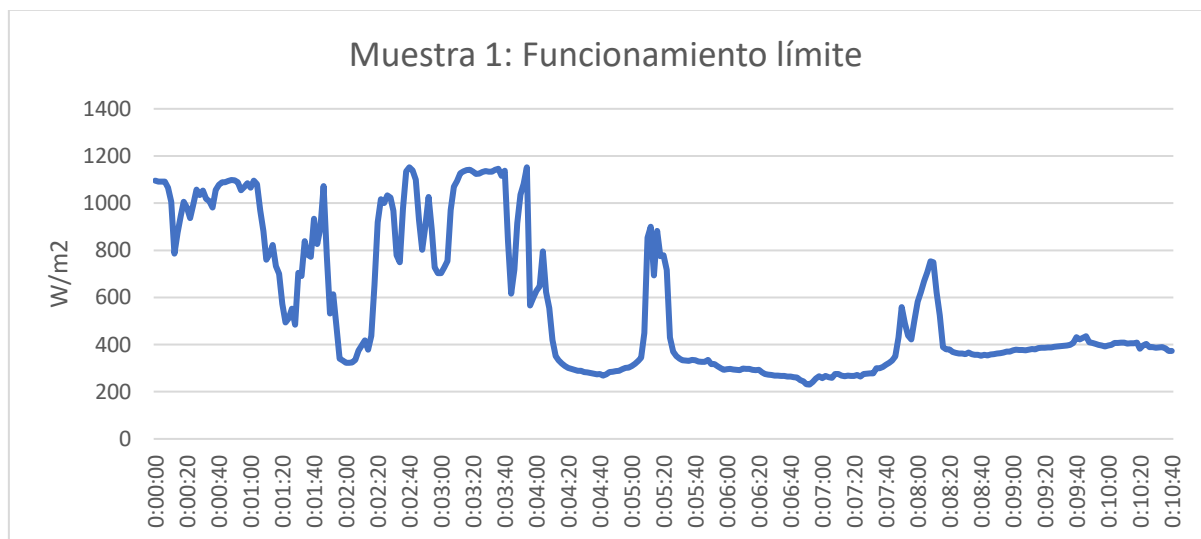


Figura 57 Muestra 1 de irradiancia

$$\lambda_{media} = 564 \text{ W/m}^2$$

Irradiancia alta

En un segundo muestreo se consiguió tomar medidas de irradiancia elevadas en una situación relativamente estable pero breve. En la siguiente gráfica podemos observar los datos de irradiancia registrados:



Figura 58 Muestra 2 de irradiancia

$$\lambda_{media} = 676 \text{ W/m}^2$$

Durante los tres primeros minutos, antes de la entrada de una nube, tenemos valores de irradiancia estables en torno a los 1000 W/m^2 .

Los datos recopilados experimentalmente se encuentran recogidos en la siguiente tabla:

Tabla 17 Datos experimentales de la segunda sesión

$\lambda \text{ (W/m}^2\text{)}$	$V_{\text{paneles}} \text{ (DC)}$
1100	103
1105	103
1090	102
1082	107
1060	110
1070	110
1040	113

Los datos aquí presentados fueron tomados de forma puntual durante un intervalo de tiempo corto y sujetos a cierta variabilidad. Como podemos observar a partir de $\lambda = 1040 \text{ W/m}^2$ los valores de tensión a la entrada del controlador disminuyen. Esto puede ser debido al efecto del seguidor de máximo punto de potencia (MPPT).

Tomaremos los datos de $\lambda = 1040 \text{ W/m}^2$ al ser la irradiancia la más cercana a condiciones estándar de medida. Si comparamos estos valores con los teóricos del controlador podemos comprobar que se encuentran entre los valores de operación del sistema.

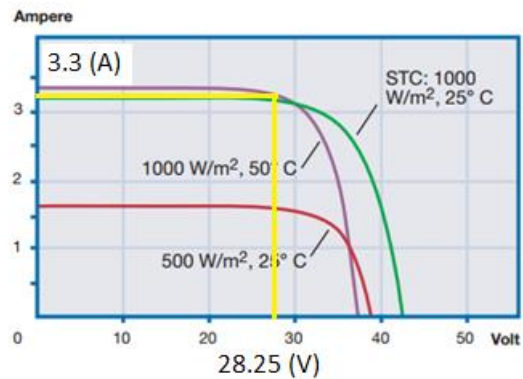
- $V_{FV (exp)} = 113 \text{ V}$.
- $V_{entrada nominal} = 120 \text{ V}$.
- $V_{FV (cem)} = 4 \cdot V_{pmax} = 138 \text{ V}$.

Conociendo el valor de tensión de salida del generador fotovoltaico podemos intentar aproximar el punto de funcionamiento del mismo.

$$V_{panel} = \frac{V_{FV}}{4} = \frac{113}{4} = 28.25 \text{ (V)}$$

Si empleamos la gráfica adjunta en la hoja de características del panel (suponemos una irradiancia estándar y una temperatura de funcionamiento de 50°C):

- $V_{panel} = 28.25 \text{ (V)}$
- $I_{panel} = 3.3 \text{ (A)}$
- $P_{panel} = V_{panel} \cdot I_{panel} = 93.22 \text{ (W}_p\text{)}$



La potencia total del generador fotovoltaico será:

$$P_p = n_{paneles} \cdot P_{panel} = 8 \cdot 93.22 = 745.8 \text{ (W}_p\text{)}$$

Como podemos observar los módulos fotovoltaicos presentan una pérdida de potencia del 6.78%, esto puede deberse a diversos factores tales como sombreado, acumulación de suciedad, degradación (LID) o efectos de mismatching.

Conociendo el rendimiento del generador podemos calcular la potencia entregada a la bomba:

$$P_1 = P_p \cdot \eta_{inversor} = 745.8 \cdot 0.95 = 708.51 \text{ (W)}$$

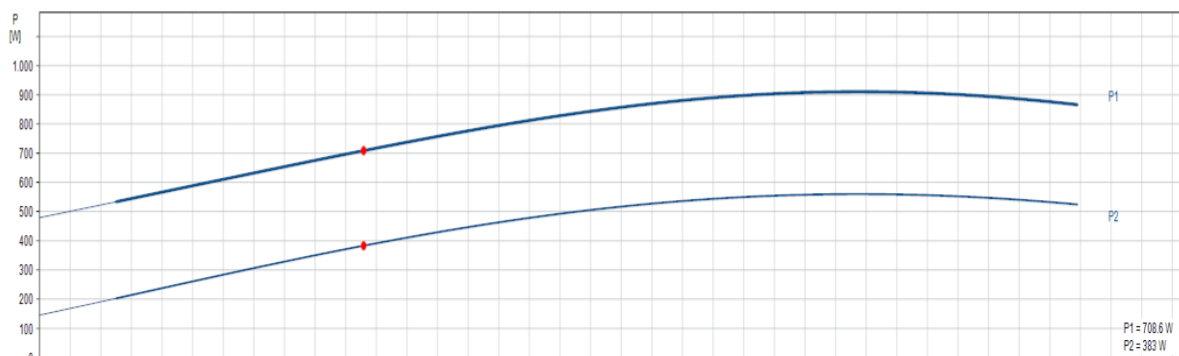


Figura 59 Curva de potencias P1 y P2 de la bomba

- $P_1 = 708.51 \text{ (W)}$
- $P_2 = 383 \text{ (W)}$

$$\eta_B = P_2 / P_1 = 0.54 > 0.4$$

3.3.5 Presentación de resultados

A partir de los datos calculados previamente, tanto de forma teórica como determinados experimentalmente, se procederá a la evaluación y comparación de los mismos. Se pretende determinar el funcionamiento teórico del sistema y compararlo con su funcionamiento en condiciones reales.

Estudio teórico

En primer lugar, evaluaremos el comportamiento del modelo teórico del sistema, del cual destacaremos los siguientes datos:

- $G_{dm}(\alpha, \beta) = 4.56 \text{ kWh/m}^2\text{día}$
- $E_B = 3.03 \text{ kWh/día}$
- $HSP = 4.56 \text{ h/día}$
- $Q_d = 13.8 \text{ m}^3/\text{día}$
- $Q_p = 3.02 \text{ m}^3/\text{h}$.
- $H_p = 0.04 \cdot Q_d^2 = 7.62 \text{ m}$.
- $H_{estática} = 22.86 \text{ m}$.
- $P_p = 880 \text{ W}$.

Podemos realizar una primera comprobación de la altura equivalente en pérdidas, para confirmar que se encuentra en un rango normal para este tipo de sistemas. Por lo general en sistemas de bombeo fotovoltaico la altura equivalente en pérdidas ronda el 10% de la altura estática. En el caso de este estudio podemos comprobar que se aproxima:

$$\frac{H_p}{H_{estática}} = \frac{7.62}{22.86} = 33 \%$$

Como se puede observar el valor es tres veces superior a lo esperado, lo que puede deberse a diversos factores. En primer lugar hemos calculado el coeficiente de fricción para un caudal cuyo valor es la mitad del resultado obtenido, induciendo cierto error en los cálculos. Este resultado nos indica que se han supuesto unas condiciones de diseño bastante desfavorables que incurren en grandes pérdidas. La aproximación correcta sería recalcular todo el sistema a partir de valores más cercanos a los de este ensayo y partir de esta primera aproximación como valor de referencia.

Un factor clave del funcionamiento de un sistema de bombeo fotovoltaico es el rendimiento de los paneles. En el caso de esta comunidad el conjunto generador está correctamente dimensionado y orientado, por lo que las pérdidas de potencia esperadas serán debidas al factor de irradiación, el factor de acoplo del controlador (seguidor MMPT) y a pérdidas por degradación de los paneles. Dados los cálculos previamente realizados la pérdida teórica de rendimiento debido a ambos factores será:

$$\text{Afectación del rendimiento FV} = 1 - F_i \cdot F_m = 1 - 0.93 \cdot 0.95 = 11.65\%$$

Podemos emplear un índice simple de eficiencia del sistema, relacionando el volumen diario extraído con la potencia instalada en el generador fotovoltaico:

$$\epsilon_{SBFV} = \frac{Q_p(l/día)}{P_p(W_p)} = \frac{13.8 (m^3/día) \cdot \frac{1000 (l)}{(m^3)}}{800 (W_p)} = 17.25 (l/W_p)$$

El índice de calidad más empleado en sistemas fotovoltaicos es conocido como *Performance Ratio*, o PR. Este índice se emplea en sistemas de generación fotovoltaicos conectados a red, pero existe una forma de adaptarlo a sistemas de bombeo fotovoltaicos.

Esta redefinición del concepto PR resulta de gran utilidad, puesto que en el sector fotovoltaico es un término de referencia. El autor, Luis Narvarte, es un experto en bombeo fotovoltaico y propone la definición de un PR asociado a la conversión en energía hidráulica de la bomba de la siguiente manera: [28]

$$PR_{HID} = \frac{E_B}{P_p} \cdot \frac{1}{\int (G/\lambda^*) dt}$$

- E_B = Energía hidráulica de bombeo
- P_p = Potencia pico instalada
- G = Irradiación
- λ^* = Irradiancia de referencia = $1000 W/m^2$
-

Para el caso de estudio el PR será:

$$PR_{HID} = \frac{E_B}{P_p} \cdot \frac{1}{\int (G/\lambda^*) dt} = \frac{3030 (Wh/día)}{800 (W_p)} \cdot \frac{1}{\frac{4.56 (kWh/m^2 día)}{1 (kW/m^2)}} = 83.06\%$$

Estudiemos ahora la capacidad del sistema para suplir la demanda. El consumo medio diario en la comunidad es desconocido, ya que no existe ningún tipo de sistema de medición de caudal. A partir de los datos obtenidos en el estudio teórico se podría satisfacer una demanda media de:

$$Demanda = Q_d = 13.8 m^3/día$$

El consumo medio por habitante en estas condiciones de funcionamiento sería:

$$V_{habitante} = \frac{13.8 (m^3/día)}{130 habitantes} \cdot \frac{1000 (l)}{(m^3)} = 106.15 l.$$

Este valor medio por habitante es elevado, según datos de la OMS se considera un abastecimiento básico un volumen de $50 l/persona día$. [31]

Esto nos indica que el sistema ha sido dimensionado correctamente para ofrecer un acceso completo al abastecimiento de agua potable.

Análisis experimental

A continuación, evaluaremos el comportamiento real del sistema. Para ello emplearemos los datos obtenidos previamente. Tomaremos los valores correspondientes a una irradiancia de condiciones estándar de medida ($\lambda = 1000 \text{ W/m}^2$).

En primer lugar, calcularemos el caudal diario medio a partir del caudal pico estimado y las horas solares pico (HSP).

- $Q_p = 2.32 \text{ m}^3/\text{h}$.
- $\text{HSP} = 4.56 \text{ h/día}$

$$Q_d = Q_p \cdot \text{HSP} = 2.32 \cdot 4.56 = 10.58 \text{ m}^3/\text{día}.$$

Como se pudo comprobar en el análisis de potencia, esta alcanzaba un valor asintótico en altas irradiancias. El controlador no disponía de medidor de potencia, pero se hicieron los cálculos a partir de la tensión, como se pudo observar previamente. Se obtuvo un valor de potencia $P_{p(\text{exp})} = 745.8 \text{ W}_p$.

Podemos determinar, por lo tanto, que el generador fotovoltaico ha visto reducido su rendimiento de la siguiente manera:

$$\text{Afectación del rendimiento} = 1 - \frac{P_{p(\text{exp})}}{P_p} = 1 - \frac{745.8}{800} = 6.8\%$$

En sistemas con inversores y seguimiento MPPT es normal encontrar pérdidas en torno al 5%, el resto puede ser debido a otros factores tales como suciedad acumulada, degradación de las células fotovoltaicas (LID, PID), etc. Dado que la instalación del sistema es relativamente reciente, no existen grandes pérdidas por desgaste. El factor más probable de pérdida de rendimiento es el sombreado de los paneles, como se pudo observar al visitar la instalación.

Podemos emplear un índice simple de eficiencia del sistema, relacionando el volumen diario extraído con la potencia instalada en el generador fotovoltaico:

$$\epsilon_{SBFV} = \frac{Q_p(\text{l/día})}{P_p(W_p)} = \frac{10.6 (\text{m}^3/\text{día}) \cdot \frac{1000 (\text{l})}{(\text{m}^3)}}{800 (W_p)} = 13.25 (\text{l}/W_p)$$

Tal y como se explicó anteriormente, se aplicará el mismo índice PR [28]. No obstante, en este caso no se puede emplear el valor de energía hidráulica de bombeo calculado teóricamente, pues el caudal es diferente. Recalcularemos el valor de dicha energía con las condiciones reales de caudal y empleando el mismo valor de rendimiento de la bomba ($\eta_B = 0.4$):

- $H_{te} = 30.48 \text{ m.}$
- $P_p = 800 \text{ W.}$
- $G_{dm}(\alpha, \beta) = 4.56 \text{ kWh/m}^2\text{día}$

$$E_B = \frac{E_H}{\eta_B} = \frac{\rho g Q_d H_{te}}{3600 \eta_B} = \frac{997 \cdot 9.81 \cdot 10.6 \cdot 30.48}{3600 \cdot 0.4} = 2.19 \text{ kWh/día}$$

$$PR_{HID} = \frac{E_B}{P_p} \cdot \frac{1}{\int (G/\lambda^*) dt} = \frac{2190 \text{ (Wh/día)}}{800 \text{ (W}_p\text{)}} \cdot \frac{1}{\frac{4.56 \text{ (kWh/m}^2\text{día)}}{1 \text{ (kW/m}^2\text{)}}} = 60\%$$

Estudiemos ahora la capacidad del sistema para suplir la demanda. El consumo medio diario en la comunidad es desconocido, ya que no existe ningún tipo de sistema de medición de caudal. A partir de los datos obtenidos en el estudio teórico se podría satisfacer una demanda media de:

$$Demanda = Q_d = 10.6 \text{ m}^3/\text{día}$$

El consumo medio por habitante en estas condiciones de funcionamiento sería:

$$V_{habitante} = \frac{10.6 \text{ (m}^3/\text{día)}}{130 \text{ habitantes}} \cdot \frac{1000 \text{ (l)}}{\text{(m}^3\text{)}} = 81.53 \text{ l.}$$

Este valor medio por habitante es elevado, según datos de la OMS se considera un abastecimiento básico un volumen de $50 \text{ l/persona día.}$ [31]

Esto nos indica que el sistema ha sido dimensionado correctamente para ofrecer un acceso completo al abastecimiento de agua potable.

Comparación de resultados y conclusiones

En vista a los datos obtenidos tanto en el estudio teórico como en el análisis experimental podemos observar una diferencia de rendimiento real frente al teórico. Si bien es cierto que pueden existir errores debido a las suposiciones y simplificaciones realizadas en el estudio, se intentará abordar el origen de estas diferencias. En ambos casos de estudio el sistema cumple con las necesidades básicas de abastecimiento de agua.

Caudal

En el estudio teórico se ha podido comprobar que el dimensionamiento del sistema puede cumplir perfectamente las necesidades básicas de los miembros de la comunidad proporcionando un volumen medio por habitante de 106.15 l/día . El volumen de bombeo diario se sitúa en $13.8 \text{ m}^3/\text{día}$. En el caso real el volumen medio por habitante se sitúa en 81.53 l/día , valor aceptable para asegurar un abastecimiento de agua de calidad.

En el caso del análisis experimental este ha revelado un caudal máximo de bombeo inferior al valor teórico. Hay que tener en cuenta las condiciones en las que se midió el caudal y el gran error que puede propagarse de este cálculo. No obstante, todas las suposiciones han sido realizadas del lado de la seguridad, por lo que es predecible observar una caída de caudal y, por tanto, rendimiento frente al modelo teórico.

- $Q_{p(\text{exp})} = 2.32 \text{ m}^3/\text{h}$
- $Q_{p(\text{teo})} = 3.02 \text{ m}^3/\text{h}$

Rendimiento del sistema

En este cálculo se está teniendo en cuenta una radiación diaria media relativamente elevada, lo que se traduce en 4.56 HSP. En las diferentes reuniones con miembros de la comunidad se puso de relieve que el sistema no suele conectarse más de tres o cuatro horas al día, valores siempre inferiores a las HSP. Durante las horas de conexión no siempre se dispone de valores aceptables de irradiancia, por lo que el sistema no dispone de todo el recurso solar calculado teóricamente.

La diferencia entre volúmenes de agua bombeada puede ser debida a un rendimiento deficiente del sistema, si bien hay que tener en cuenta los factores previamente nombrados. Si comparamos los indicadores de rendimientos estudiados podemos intentar profundizar para encontrar las causas de este comportamiento.

En primer lugar, se analizará el comportamiento del generador fotovoltaico para determinar la pérdida de rendimiento sufrida en este elemento.

Como se ha visto tras el análisis de los datos experimentales de potencia de entrada a la bomba, el generador fotovoltaico está operando con una potencia pico real $P_{p(\text{exp})} = 745.8 \text{ W}_p$. Esto supone una pérdida de potencia del 6.8 %, lo cual se considera un valor dentro de la normalidad.

El problema, por lo tanto, no está en el generador fotovoltaico.

Comparando los índices PR de ambos estudios observamos una diferencia, la cual supone una pérdida del 23.9 % en condiciones reales frente a condiciones teóricas.

- $PR_{HID(exp)} = 60\%$
- $PR_{HID(teo)} = 83.06\%$

Si profundizamos en la ecuación que define el PR nos encontramos con que esta diferencia se debe al valor de la energía hidráulica de bombeo. El cálculo de esta energía arroja un resultado mucho menor en condiciones reales, al ser el caudal aproximadamente la mitad del valor teórico.

$$PR_{HID} = \frac{E_B}{P_p} \cdot \frac{1}{\int (G/\lambda^*) dt}$$

- $E_{B(teo)} = 3.03 \text{ (kWh/día)}$
- $E_{B(exp)} = 2.19 \text{ (kWh/día)}$

Si suponemos que el recurso solar ha sido estimado correctamente y, por tanto, la energía disponible de bombeo se acerca a su valor teórico, la única opción que explica la disminución del caudal es por pérdidas o por un rendimiento muy bajo del conjunto motor-bomba.

$$E_B = \frac{E_H}{\eta_B} = \frac{\rho g Q_d H_{te}}{3600 \eta_B}$$

No obstante, debido a la información aportada por miembros del CAPS de la comunidad, la bomba trabaja menos horas al día que el valor calculado de HSP. Además, la estimación del caudal resulta demasiado simple y abierta a errores. El caudal calculado es un caudal mínimo despreciando los efectos de reposición de la fuente

En una primera comprobación del comportamiento de la bomba empleando software de Grundfos se han definido los siguientes parámetros de funcionamiento:

- $Q_d = 2.32 \text{ m}^3/h$
- $H_{te} = 30.48 \text{ m.}$

En la siguiente gráfica se puede observar el punto de trabajo de la bomba en su curva característica:

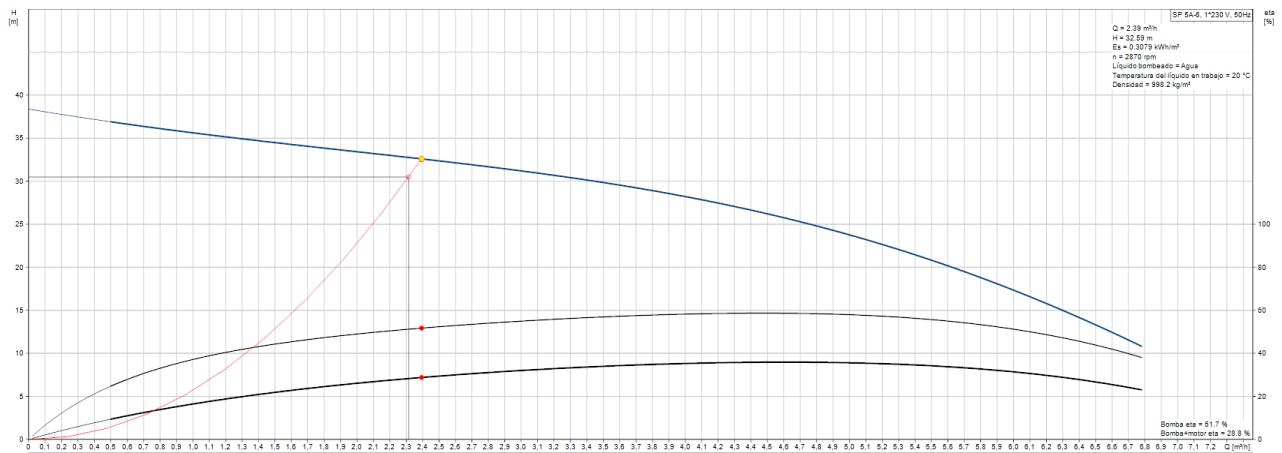


Figura 60 Punto de trabajo de la bomba. [29]

Como se puede observar, el caudal esperado para este modelo de bomba en las condiciones de funcionamiento reales debería ser $Q_p = 2.39 \text{ m}^3/\text{h}$, para una altura total de $H_{te} = 32.59 \text{ m}$. Estas condiciones son prácticamente las de funcionamiento real.

Según el fabricante, el rendimiento del conjunto motor bomba es menor que el estimado en los cálculos (0.4), tomando un valor de:

$$\eta_B = 28.8 \%$$

A partir de esta información podemos determinar que los parámetros reales de funcionamiento de la bomba se corresponden con lo esperado. La disparidad de valores frente al estudio teórico es debida a las diferencias en las condiciones de contorno reales.

En primer lugar, los valores de irradiación solar media diaria y horas solares pico son ciertamente elevados. El rendimiento real del generador fotovoltaico se encuentra comprendido entre valores aceptables, por lo que podemos afirmar que funciona correctamente. Las condiciones de trabajo reales también se aproximan a las especificadas por el fabricante.

Con esto podemos determinar que el sistema está bien dimensionado, cumple con las necesidades de abastecimiento de la comunidad y opera dentro de unos parámetros esperados. La diferencia del modelo teórico es probablemente debida al recurso solar estimado. Si bien hemos encontrado valores de irradiancias muy elevados durante las sesiones de campo, la variabilidad del clima y otros factores afectan a la cantidad de horas netas de bombeo y, por tanto, disminuye el rendimiento del sistema.

3.3.6 Problemas identificados:

Operación del sistema

En la primera visita a la comunidad de “El Lagartillo” se detectó un nivel extremadamente bajo en el pozo. Se podía ver como asomaba la cabeza de la bomba. El responsable del CAPS que acompañaba pensaba que el pozo estaría a rebosar antes de abrirlo, lo cual indica que no existe un control exhaustivo de los niveles del pozo. La pila, sin embargo, se encontraba llena hasta su máxima capacidad, tanto que rebosaba una gran cantidad de agua por el conducto superior.

El control del sistema es una tarea que va rotando entre las diferentes familias de la comunidad, estableciéndose turnos para conectar y desconectar el sistema. La cantidad de horas de bombeo se estima sin hacer un sondeo del pozo, sin comprobar el volumen de agua de la pila y sin ningún tipo de información acerca de la radiación solar.

Durante la reunión con los miembros del CAPS se dieron indicaciones para la correcta operación del sistema:

- No activar el sistema de bombeo cuando se observe que la pila de almacenamiento presenta un nivel elevado.
- Comprobar el nivel del pozo antes de conectar el sistema de bombeo para evitar que la bomba pueda llegar a trabajar en seco.

Una mala gestión de la operación del sistema puede traer consecuencias nefastas para la comunidad. En el caso presente, se estaba desperdiciando una gran cantidad de agua de un pozo de capacidad limitada, afectando directamente a la futura disponibilidad de agua y a la capacidad de regeneración de la fuente.

Otro gran peligro es la posible exposición de la bomba a “funcionamiento en seco”, el cual de haber sucedido hubiera dañado la bomba irremediablemente. La ausencia de un sensor de nivel juega un papel crítico, como se explica a continuación.

Ausencia de sensor de nivel en la bomba

La bomba sumergible instalada en el pozo cuenta con un sistema de seguridad que previene el funcionamiento en seco de la misma. Existe un sensor situado en la bomba que, de hallarse por encima del nivel estático del pozo, envía una señal de error al controlador y detiene la bomba.

Según información aportada por los miembros del CAPS el sensor de la bomba dio un fallo y bloqueaba el funcionamiento de la bomba, por lo que se optó por desconectarlo. Se puede comprobar observando la caja de conexiones del controlador. Actualmente la bomba se encuentra desprotegida frente a un descenso de nivel en el pozo con riesgo de quemarse si el nivel desciende lo suficiente.

Calidad del agua en invierno

Durante los meses de invierno no existen problemas con las reservas de agua, ya que la zona cuenta con abundantes precipitaciones. Existe un sistema de captación suplementario al pozo que proporciona agua a la comunidad. El problema con las lluvias es la contaminación que producen al arrastran sedimentos, así como la infiltración de esta agua sin tratar en los sistemas de almacenamiento. Esto produce que el agua tenga una elevada turbidez y pueda presentar contaminantes orgánicos.

La mayoría de miembros de la comunidad cuenta con sistemas de filtrado cerámicos (FILTRON), pero no se realiza un mantenimiento de estos sistemas. La pila de almacenamiento tiene programada una limpieza bimensual, la cual se realiza periódicamente según información de miembros del CAPS.

Existe un sistema de cloración, pero está instalado en la pila que actualmente se encuentra en desuso, por lo que no afecta al sistema. Se recomendó la instalación de este elemento a la entrada de la pila de almacenamiento actualmente en uso.



Sistema de cloración



Muestra de agua

Suministro de agua en verano

En las entrevistas realizadas a los miembros de la comunidad se identificó el mayor problema de esta comunidad, la falta de agua durante los meses secos del verano (marzo y abril). Durante esta época el CAPS se reúne con la comunidad y se acuerdan las restricciones a imponer en función de las reservas de agua. Normalmente cada familia tiene acceso durante unos 30 minutos cada uno o dos días.

El problema en este caso no es la disponibilidad energética del recurso solar, sino la capacidad de recarga de la fuente. El pozo no tiene una gran capacidad de explotación y se intentó perforar uno nuevo (a mano) sin éxito por el momento.

El sistema de bombeo fotovoltaico está bien dimensionado y funciona correctamente, pero el problema es ajeno al mismo. Cabe destacar los esfuerzos de la comunidad por proteger el entorno de la fuente de agua y proteger el bosque, aumentando la capacidad de regeneración de los acuíferos.

Crecimiento de la vegetación en la zona de los paneles

La vegetación que se encuentra en la zona del arreglo fotovoltaico está creciendo por encima de la altura del mismo, como se puede apreciar en las siguientes imágenes:



Sombreado en el sistema de generación de la comunidad de “El Lagartillo” debido a la vegetación. Fuente: Autor

En la reunión que se tuvo con el CAPS se expuso que esto puede provocar problemas de sombreado en un futuro que afecten al rendimiento del sistema y se recomendó la poda de dichos árboles.

Para resaltar la importancia del efecto del sombreado y conseguir que esta calara en los miembros de la comunidad, se explicó a grandes rasgos la construcción y funcionamiento de un panel FV. Se consiguió transmitir la idea de que, tapando una sola célula del panel, gran parte del mismo deja de funcionar con normalidad.

Inexistencia de sistemas de medición de caudal

La comunidad de “El Lagartillo” no cuenta, en la actualidad, con ningún sistema de medición de caudal funcional. Como se demostró previamente los dos caudalímetros instalados a la salida del pozo no ofrecen una medida real. Tampoco existen sistemas de micro medición, al ser la red de distribución pública.

Al no contar con ningún sistema que permita registrar los volúmenes de agua extraídos del pozo y consumidos por sus usuarios no existe un control del sistema. No se pueden calcular y prever demandas para estudiar sistemas alternativos de almacenamiento, no se puede mantener un control de la capacidad de la fuente, etc.

Se recomendó a los miembros de la comunidad contactar con las entidades pertinentes para exponer esta problemática y tratar de hallar una solución.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UNDP, «Sustainable Development Goals,» [En línea]. Available: <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>. [Último acceso: Julio 2017].
- [2] FAO, «Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Nicaragua,» [En línea]. Available: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/nic/indexesp.stm. [Último acceso: Julio 2017].
- [3] UNPD, «Programa de las naciones unidas para el desarrollo en Nicaragua,» [En línea]. Available: <http://www.ni.undp.org/content/nicaragua/es/home/countryinfo>. [Último acceso: Julio 2017].
- [4] «Wikipedia,» [En línea].
- [5] WHO/UNICEF, «Joint Monitoring Programme,» 2015. [En línea]. Available: <https://washdata.org/data#!/nic>. [Último acceso: Mayo 2017].
- [6] INAA, «Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados. Antecedentes,» [En línea]. Available: <http://www.inaa.gob.ni/institucion/antecedentes/?searchterm=antecedentes>.
- [7] OMS, «Evaluación de los Servicios de Agua y Saneamiento en las Américas,» 2000.
- [8] Interamerican Development Bank, «Nicaragua. Water supply and sanitation investment program. Loan proposal,» 2006. [En línea]. Available: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=857010>. [Último acceso: julio 2017].
- [9] AECID/Secretariado Alianza por el Agua, «La Gestión de los comités de agua y saneamiento en Nicaragua,» [En línea]. Available: http://alianzaporelagua.org/documentos/Gestion_Comunitaria_Agua/Nicaragua.pdf. [Último acceso: Julio 2017].
- [10] AECID, «Cooperación española en Nicaragua,» [En línea]. Available: <http://www.aecid.org.ni/>. [Último acceso: julio 2017].
- [11] Fondo de cooperación para agua y saneamiento, «Programa Integral Sectorial de Agua y Saneamiento Humano de Nicaragua (PISASH),» [En línea]. Available: <http://www.fondodelagua.aecid.es/es/fcas/noticias/audiovisual/PISASH>.
- [12] PNUD/COSUDE, «Enfoque Territorial contra el Cambio Climático, medidas de adaptación y reducción,» [En línea]. Available: http://procurement-notices.undp.org/view_file.cfm?doc_id=55720. [Último acceso: Julio 2017].

- [13] ECODES, «ECODES,» [En línea]. Available: <http://ecodes.org/>. [Último acceso: Julio 2017].
- [14] TECNOSOL, «TECNOSOL,» [En línea]. Available: <http://www.tecnosolsa.com.ni>.
- [15] SANAA/KFW/IRC, «Sistemas de agua potable. Programa de Agua y Saneamiento Choluteca/Valle,» [En línea]. Available: <https://www.ircwash.org/sites/default/files/205.1-16808.pdf>. [Último acceso: Julio 2017].
- [16] COSUDE, «El Mercado de las Bombas de Mecate en Nicaragua,» 2008. [En línea]. Available: http://www.wsp.org/sites/wsp.org/files/publications/Estudio_de_Bombas_Final.pdf. [Último acceso: Julio 2017].
- [17] UPM/ISF/UCLM/AECID, «Manual práctico de construcción, instalación, operación y mantenimiento de bombas de mecate,» [En línea]. Available: http://www.ongawa.org/wp-content/uploads/2011/08/bomba_mecate_espa.pdf. [Último acceso: Julio 2017].
- [18] Ropepumps, «Ropepumps,» [En línea]. Available: <http://www.ropepumps.org/>. [Último acceso: Julio 2017].
- [19] EMAS-International, «EMAS-International,» [En línea]. Available: <http://www.emas-international.de/index.php?id=32&L=3>.
- [20] R. A. Rodríguez, «Tecnologías alternativas para el aprovechamiento de agua,» 2003. [En línea]. Available: http://www.bvsde.org.ni/Web_textos/UCA-NITLAPAN/NITLAPAN0011/tec%20alternativas%20para%20el%20apr.pdf. [Último acceso: Julio 2017].
- [21] AMEC, «AMEC,» [En línea]. Available: <http://amecnicaragua.org/tecnologias/>. [Último acceso: Julio 2017].
- [22] FILTRON, «FILTRON,» [En línea]. Available: <https://www.filtronnica.com/>. [Último acceso: Julio 2017].
- [23] Wikipedia, «Energía solar fotovoltaica,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_fotovoltaica#cite_note-25. [Último acceso: Julio 2017].
- [24] International Renewable Energy Agency, «Letting in the Light: How solar photovoltaics will revolutionise the electricity system,» [En línea]. [Último acceso: julio 2017].
- [25] SINO Voltaics, «PID and LID: Devastating Phenomena for PV plants,» [En línea]. Available: <http://sinovoltaics.com/quality-control/pid-lid-devastating-phenomena-pv-plants>. [Último acceso: Julio 2017].
- [26] O. R. Short TD, Solar powered water pumps: the past, the present and the future. Journal, 2003.

- [27] Sitio Solar, «Sitio Solar,» [En línea]. Available: <http://www.sitiosolar.com/el-bombeo-solar-fotovoltaico/>.
- [28] L. Narvarte, Especificaciones Técnicas para Sistemas de Riego Fotovoltaico, 2017.
- [29] Grundfos, «www.grundfos.com,» [En línea].
- [30] S. Arnalich, «Instalacion de un Sondeo,» marzo 2008. [En línea].
- [31] WHO, «Domestic Water Quantity, Service, Level and Health,» [En línea]. Available: http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/WSH0302.pdf.
- [32] Abella M., Romero F. (CIEMAT), «Sistemas de Bombeo Fotovoltaico,» [En línea]. Available: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45334/componente45332.pdf. [Último acceso: Julio 2017].
- [33] NASA, «Surface meteorology and Solar Energy,» [En línea]. [Último acceso: Julio 2017].
- [34] Sandia National Laboratories (SNL), «Water Pumping (the solar alternative),» [En línea]. Available: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/1987/870804.pdf>. [Último acceso: Julio 2017].
- [35] CIA, «The world factbook,» [En línea]. Available: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/nu.html>. [Último acceso: Junio 2017].
- [36] ECODES, «Manual para sistemas de agua potable a través de energías renovables,» [En línea]. Available: [http://red-des.org/media/publicaciones/Manual%20de%20Energias%20Renovables%20para%20Proyectos%20de%20Agua%20Potable%20-%20Aprobado%20\(2\)_opt_opt.pdf](http://red-des.org/media/publicaciones/Manual%20de%20Energias%20Renovables%20para%20Proyectos%20de%20Agua%20Potable%20-%20Aprobado%20(2)_opt_opt.pdf). [Último acceso: Julio 2017].
- [37] National Renewable Energy Laboratory, «National Renewable Energy Laboratory,» [En línea]. Available: <http://www.nrel.gov/>. [Último acceso: Julio 2017].
- [38] SANDIA Lab, «Sandia National Laboratories,» [En línea]. Available: <http://www.sandia.gov/>. [Último acceso: Julio 2017].
- [39] EZ2C, «Total primary Energy Supply,» [En línea]. Available: http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/.